



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

REGULACION AUTOMATICA DE
LOS PROCESOS INDUSTRIALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE 'INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA'
PRESENTA
GUSTAVO ALBERTO OROPEZA GARCIA

México, D.F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONCEPTOS BASICOS Y SIMBOLOGIA DEL CONTROL DE PROCESOS

Introducción

La figura 1.1 representa un sistema de control automático típico, el proceso consiste en calentar petróleo crudo mediante un calentador a base de combustóleo, para tal objeto - se hace pasar el petróleo crudo a través de un gran número de - tubos, dispuestos en el interior del calentador.

El combustóleo se introduce a la cámara de combustión hasta el quemador, el cual lo atomiza y lo mezcla con la cantidad de aire adecuada a fin de quemarlo en la forma más económica. El calor producido durante la combustión, se usa para calentar el crudo a la temperatura requerida, llamada "valor deseado". Dado que el calentamiento de petróleo crudo se realiza en forma automática, ésto implica que requiere de equipo de control.

La temperatura del petróleo que abandona el calentador, "Variable Controlada" tiene que medirse, por medio de la "Unidad de Medición", la cual consiste de un "Elemento Detector", termopozo en el cual se monta un elemento sensible a la temperatura y de un "Elemento de Medición", transmisor o convertidor. La unidad de medición convierte los cambios de temperatura en una señal neumática, la cual representa la temperatura medida. Esta presión puede variar proporcionalmente con la temperatura entre 3 y 15 - psi. Esta señal neumática llamada "Valor Medido" se envía a la - "Estación de Control" por medio de una "Línea de Transmisión".

La estación de control se monta normalmente en el "Tablero de Instrumentos" que se localiza en el "Centro de Control" y cuenta con un "Elemento Receptor", el cual traduce el valor medido en un movimiento de la pluma y graba el valor medido en una "Carta de Registro".

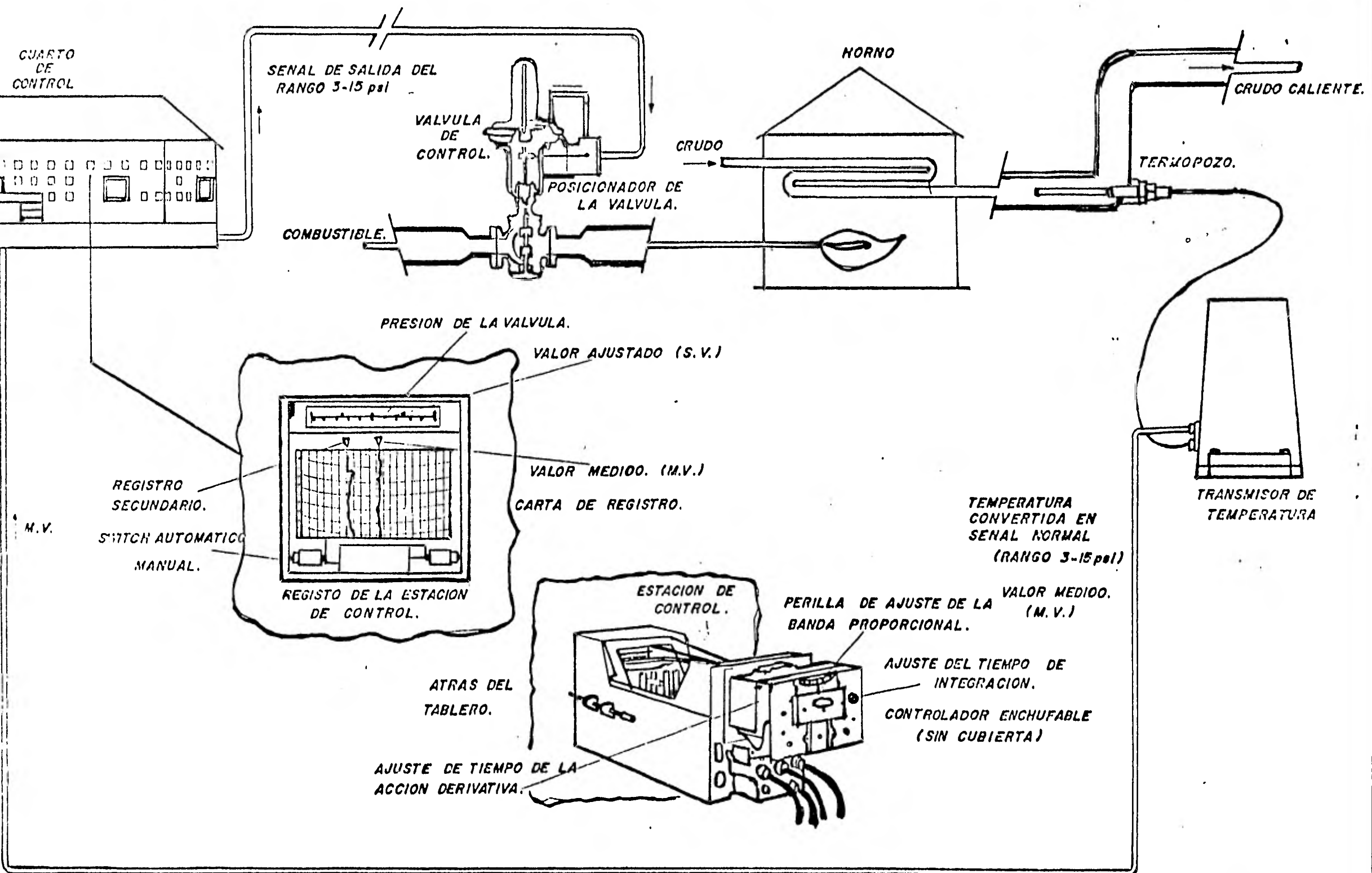
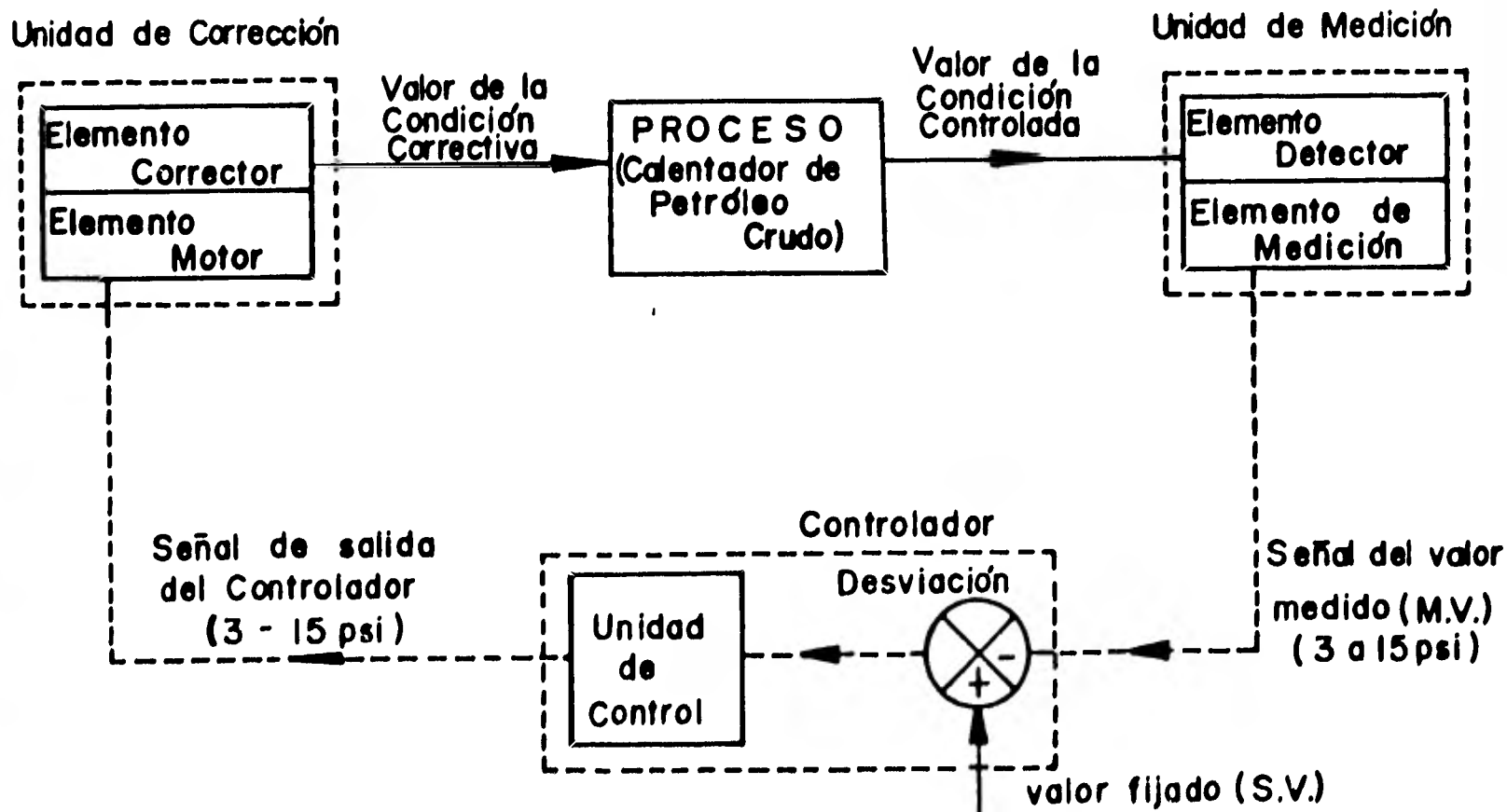


FIGURA 1.1
EJEMPLO DE UN CIRCUITO DE CONTROL .

En la parte posterior de la estación de control, se monta "El Controlador", el cual también se conecta al valor medido. El controlador compara el valor medido con el "Valor Fijado" en forma continua, el "Valor Fijado" es aquel al cual se ajusta el controlador y cuando existe alguna "Desviación", el controlador modifica el estado del sistema tratando que la desviación tienda a cero o a un valor constante. Para ello envía una señal neumática, que varía en el rango de 3 a 15 psi a la "Unidad Correctiva". La unidad correctiva normalmente es una válvula de Control; en este caso, la válvula se encuentra en la tubería del combustóleo que llega al quemador, para modificar la cantidad de combustible en la cámara de combustión y por lo tanto la temperatura del petróleo crudo. La condición que se debe cambiar a fin de eliminar la desviación se conoce como: "Acción Correctiva".

La Unidad Correctiva consiste de dos partes, el "Elemento Motor" y el "Elemento Corrector", el elemento motor se usa para ajustar al elemento corrector a la posición determinada por la señal de salida del controlador.

El circuito de control descrito anteriormente se puede simplificar mediante el diagrama de bloques que se muestra en la figura 1.2



1.1.2 Conceptos Básicos Asociados con un Sistema de Control Automático.

Sistema de Control Automático.- Se entiende por sistema de control, un sistema en el cual el valor medido de la variable controlada se compara con el valor fijado, efectuándose una corrección que depende de la diferencia entre estos dos valores. Esta corrección se efectúa sin la inclusión del elemento humano en la malla cerrada, que se forma por la cadena de elementos de comparación y de corrección. Un sistema de control automático incluye: La unidad de medición, la unidad correctiva, la unidad de control, el proceso y cualquier elemento, señales o líneas de transmisión entre ellos.

Variable Controlada.- La variable de la planta para cuya regulación se dispone el funcionamiento del sistema de control.

Acción Correctiva.- Es la acción mediante la cual se modifica el valor de la variable controlada, disminuyendo el valor de su desviación respecto al valor fijado.

Valor Deseado.- El valor al cual la variable controlada debe de mantenerse.

Valor Fijado.- El valor al cual se tiene que colocar el punto de ajuste del controlador para conservar la variable controlada al valor deseado.

En un proceso de control el valor fijado se puede ajustar manualmente o puede ser variado por medio de una señal externa al controlador.

Desviación (Desviación Real).- La diferencia entre el valor de la variable controlada y el valor deseado. El signo más (+) se le dá a una desviación cuando el valor de la variable

controlada es menor que el valor fijado y se asigna el valor negativo (-) cuando es más grande.

NOTA:

Si se pretende usar el término "desviación" en el sentido como se definió anteriormente, en un contexto, en donde pudiera confundirse con "Desviación medida", entonces se aconseja que se use el término más largo "Desviación real".

Desviación Medida.- La diferencia entre el valor medido de la variable controlada y el valor fijado.

Señal.- Es la cantidad física por medio de la cual un elemento del sistema de control influencia a otros elementos.

Controlador Automático.- Es un dispositivo en el cual la señal proveniente del elemento detector se compara, con una señal que representa el valor fijado, operando en consecuencia para reducir la desviación medida. Esto se logra enviando la señal de control a un transmisor, mismo que la envía a la unidad correctiva, ésta a su vez ajusta el valor de la cantidad física de la que depende el valor de la variable controlada. El controlador automático comprende el elemento de comparación y la unidad de control.

Unidad de Medición.- La unidad comprende elemento detector y el elemento de medición, los cuales dan el valor medido de la variable controlada.

Elemento Detector.- Es aquella parte de la unidad de medición que responde directamente al valor de la variable controlada, convirtiéndola en otro tipo de señal fácilmente medible. - También conocido como transductor.

Elemento de Medición.- Es la parte de la unidad de medición la cual responde a la señal del elemento detector.

Unidad Correctiva.- Esta unidad será integrada por los elementos tales como el elemento motor, el elemento corrector, mismos que ajustan la cantidad física de la que depende la variable controlada, en función de la señal que proviene de la unidad de control.

Elemento Motor.- Es la parte de la unidad de corrección que ajusta el elemento corrector como respuesta a la señal proveniente de la unidad de control.

Elemento Corrector.- Aquella parte de la unidad de corrección la cual afecta directamente el valor de la acción correctiva.

1.2 Sistema de Identificación de Instrumentos y Símbolos.

Con la idea de llegar a una uniformidad en el diseño y la representación del equipo de control, se ha intentado hacer una selección de los métodos normalizados para representación de instrumentos, mediante símbolos, en un método el cual es lo suficientemente flexible para cubrir la variedad de los requerimientos técnicos de las compañías de diseño.

Símbolos Básicos

El símbolo para un instrumento es un círculo de línea delgada de aproximadamente 10 mm. de diámetro, en el cual se puede colocar un número de identificación. Este círculo se puede conectar a una línea cercana, a los puntos o al punto de medición, por medio de líneas finas de aproximadamente 5 mm. de longitud, conocidas como Líneas de Impulso. Todas las líneas que llegan al símbolo del instrumento pueden ser verticales u horizontales. Según se muestran en las fig. 1.3 y 1.4 - respectivamente.

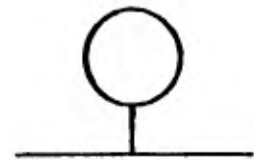


Figura 1.3 a)

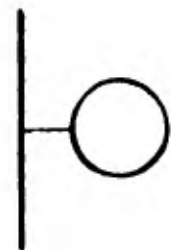


Figura 1.4 b)

En caso de que las unidades de medición estén ubicadas en la línea de flujo y que el instrumento o una parte funcional de él, como por ejemplo la de indicación, registro o control se monten en el tablero principal de instrumentos, se debe de colocar una línea horizontal dentro del círculo del instrumento respectivo según se muestra en la figura 1.5.

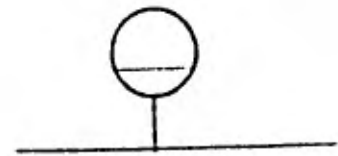


Figura 1.5

Transmisores

En el caso de que un instrumento transmita una señal a otro instrumento, los símbolos que representan estos instrumentos, deben de conectarse mediante líneas punteadas. Se recomienda que el uso de una representación independiente para un transmisor se limite a los casos en donde es esencial para la correcta interpretación de la instrumentación. Ver figura 1.6.

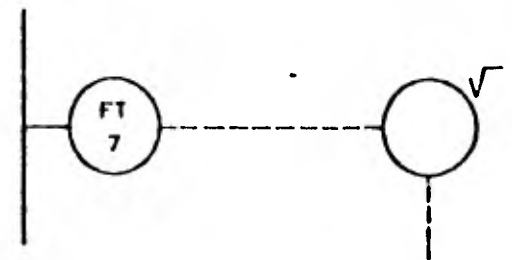


Figura 1.6

Instrumentos de Punto Múltiple

En el caso de que varios elementos de detección se conecten a un instrumento de punto múltiple, debe de mostrarse un círculo de cada punto de medición. Vease la figura 1.7.



Figura 1.7

Instrumento Controlador

Cuando el instrumento es un controlador, debe de usarse una línea punteada para conectar el instrumento a la unidad correctiva figura 1.8 a), la línea punteada se conoce como línea de control. Se hace distinción

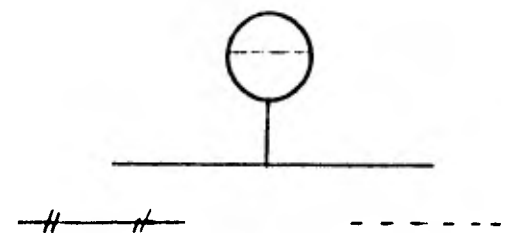
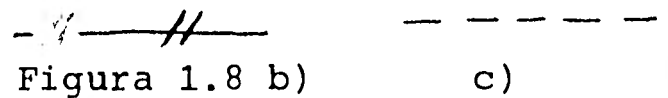


Figura 1.8 a)

entre líneas de transmisión neumáticas. Figura 1.8 b y las líneas de transmisión electrónica figura 1.8 c.



Control en Cascada

En situaciones en las que un controlador modifica el valor fijado de uno o más controladores, los círculos de instrumento deben de conectarse entre sí mediante líneas punteadas. Esto se representa en la figura 1.9.

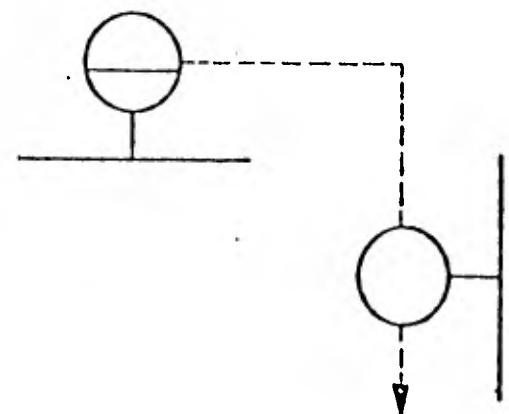


Figura 1.9

Control Compuesto

Cuando las señales de control de dos o más controladores se combinan para operar una o más unidades de combinación, los círculos de instrumento que representan los controladores, deben de conectarse mediante líneas punteadas al círculo de instrumento que representa la unidad de combinación. Por ejemplo un relevador computacional. Ver figura 1.10

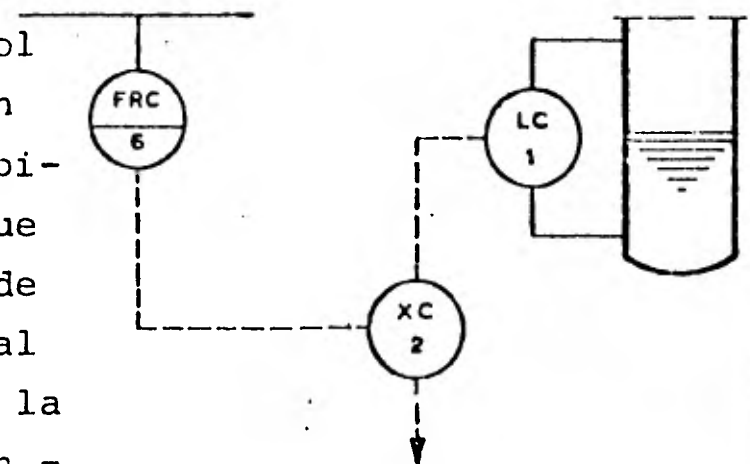


Figura 1.10

Si se hace necesario clasificar la función principal de un sistema, se permite adicionar frases breves o simplemente símbolos a los círculos de instrumento, por ejemplo; relevador sumador ó (+), extractor de raíz cuadrada ó $\sqrt{\quad}$.

En algunos casos puede ser útil mostrar sentido de las señales mediante pequeñas flechas en las líneas punteadas. (Figura 1.11)

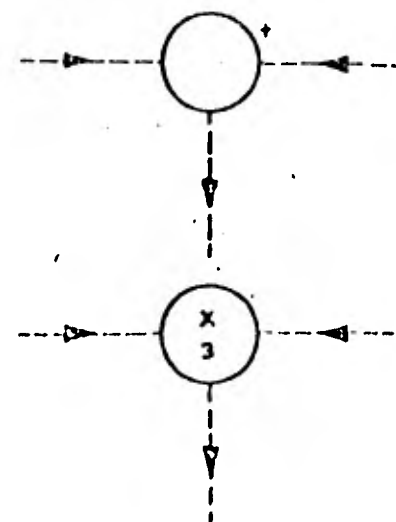


Figura 1.11

Elementos Detectores a los cuales se pueden conectar los Instrumentos.

El símbolo básico es una línea horizontal o vertical delgada de aproximadamente 5 mm de longitud, en combinación con una etiqueta numerada o una letra que representa la propiedad medida (Figuras 1.12 a y b).

Ejemplos

Codo para medición de temperatura. (Figura 1.12 c).

Placa de orificio para medición de presión (Figura 1.12 d).

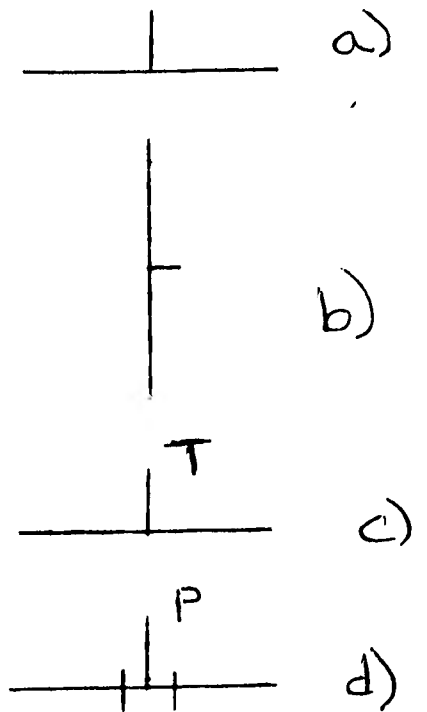


Figura 1.12

Unidades de Regulación, Válvulas de Seguridad y de Alivio.

El símbolo básico para una unidad de regulación es un semi-círculo de aproximadamente 5 mm de diámetro que se conecta por medio de una línea delgada de aproximadamente 5 mm de largo al símbolo de la unidad gobernada. (Figura 1.13).



Figura 1.13

La letra H significa que el elemento está conectado a un mecanismo diseñado para la operación manual directa. (Figura 1.14 a).



a)

El elemento corrector ira al máximo o posición abierta en caso de falla del medio de operación (Figura 1.14 b)



b)

El elemento corrector ira al mínimo o posición cerrada en caso de falla del medio de operación. (Figura 1.14 c).

El elemento corrector conservará la posición en caso de falla del medio de operación. (Figura 1.14 d).

NOTA: Se puede usar una combinación de los símbolos anteriores.

Ejemplos

Válvulas de control operadas por instrumentos:

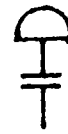
Normal (Figura 1.14 e)

Tres vías (figura 1.14 f)

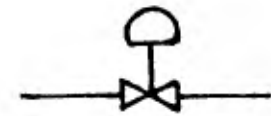
Angulo (Figura 1.14 g)



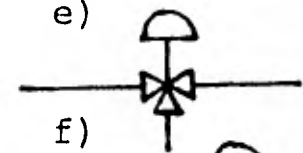
c)



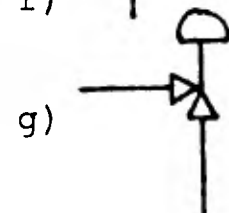
d)



e)



f)



g)

Figura 1.14 a, b, c, d, e, f, g.

Válvulas de Control Operadas Directamente

El símbolo del instrumento debe conectarse directamente al símbolo de la válvula por una línea de aproximadamente 5 mm de largo (Figura 1.15).

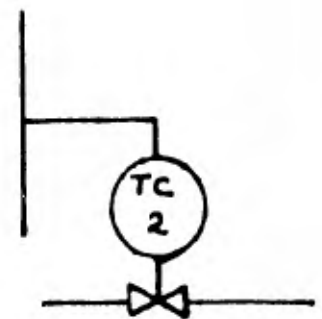
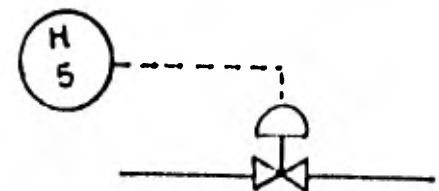


Figura 1.15

Válvulas de Control Operadas Manualmente

Se operan en forma manual y remota mediante señal neumática, hidráulica o eléctrica. La etiqueta numerada, deberá colocarse dentro de un círculo de aproximadamente 10 mm de diámetro que representa la unidad manual. Fig 1.16 a.



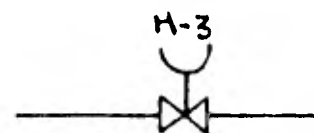
a)

Válvula de control manual, la válvula se abre cuando falla el suministro de aire.



b)

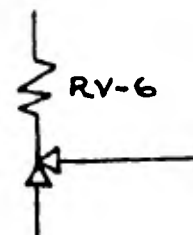
Válvula de control operada local y directamente por medio de perilla o palanca, la etiqueta numerada debe escribirse próxima al símbolo.



c)

Válvulas de alivio o de Seguridad

La etiqueta numerada, debe de escribirse próxima al símbolo (no se usa círculo).



d)

Figura 1.16

1.3 Identificación Mediante Etiquetas Numeradas

Un instrumento se identifica mediante una etiqueta numeradas, que consisten de una(s) letra(s) seguida (s) de uno (s) número (s). En ciertos casos también debe indicarse el número de la unidad de proceso.

Se usará el código de letras que se presenta en la Tabla I, en el cual la primera letra indica la propiedad medida y la (s) letra (s) siguientes (s) indica (n) la (s) función(es) del instrumento.

Sistema de Numeración

los instrumentos se clasifican en grupos de acuerdo a la propiedad que miden y cada grupo se numera secuencialmente empezando desde 1 y llenando preferentemente de izquierda a derecha en el diagrama de lazo o malla por unidad de proceso.

Ejemplos:

Flujo y Volumen

FRC-1, FR-2, FT-3,
FRA-4, FQC, etc.

Nivel	LI-1, LRC-2, LA-3, LRCA-4, LEA-5, etc.
Presión	PA-1, PRC-2, PR-3, PI-4, etc.
Temperatura	TI-1, TRC-2, TA-3, TR-4, etc.

Se forman grupos separados con:

- Elementos de Flujo primarios FW-1, F-2, FW-3, etc.
- Columnas de Vidrios (LG) LG-1, LG-2, LG-3, etc.
- Termómetros industriales montados localmente (TI) TI-1, TI-2, TI-3, etc.
- Termopozos (TW) TW-1, TW-2, TW-3, etc.
- Manómetros de presión montados localmente PI-1, PI-2, PI-3, etc.
- Instrumentos de punto múltiple a los cuales se conectan varios elementos detectores del mismo tipo. Cada instrumento se identifica por una etiqueta numerada; para identificar cada punto de medición, este número es continuado con un guión y otro número que aumenta progresivamente - TI-2-1, TI-2-2, TI-3, etc. comenzando con 1.
- Instrumentos de punto múltiple, los cuales miden distintas propiedades (por ejemplo registradores de datos). DI-1-1, DI-1-2, DI-1-3, etc.

Números de Unidades de Proceso

Para plantas o proyectos que consistan de unidades separadas, los instrumentos deben de ser numerados de acuerdo al número de la unidad, dicho número deberá proceder la etiqueta numerada. Este número de la unidad deberá abreviarse (por ejemplo si el número de la unidad es 300 sólo debe usarse el 3).

1-PI-1, 2, 3, etc.
2-PI-1, 2, 3, etc.
3-PI-1, 2, 3, etc.

La Etiqueta Numerada se Aplica Para:

La parte componente de un instrumento, Por ejemplo, elemento primario, -- transmisor, controlador, válvula de control, etc., los cuales deben identificarse mediante la etiqueta numerada del instrumento respectivo.

- Los transmisores cuando son indicados separadamente en los diagramas de gazas.

FT-3, TT-7, PT-4, etc.

- Válvulas de Control y unidades de regulación operados por instrumentos. Los cuales deben tener la misma etiqueta numerada que el instrumento respectivo.

FRC-1

En donde un sólo instrumento actúa más de una válvula, la etiqueta numerada de ésta, debe continuarse por los números 1, 2, 0 3, etc.

FRC-2-1, FRC-2-2,
FRC-2-3, etc.

En donde más de un instrumento actúa sobre una sola válvula, la válvula tendrá la etiqueta numerada de uno de estos instrumentos.

- Válvulas de Control Operadas Directamente. Se deben de identificar con una etiqueta numerada, tal como si fueran operadas por un controlador sin indicación. (ciego).

PC-12, PCA-15

- Válvulas de Control y Unidades reguladoras, operadas manualmente. Se deben marcar con letra H seguida de un número consecutivo de acuerdo al grupo.

H-1, H-2, H-3, etc.

- Válvulas de seguridad de alivio. Se deben marcar con las letras RV seguidas de un guión y un número consecutivo de acuerdo al grupo correspondiente.

RV-1, RV-2, RV-3, etc.

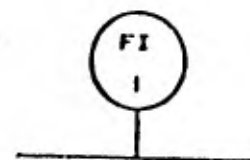
- Válvulas de Control y Unidades Reguladoras operadas de manera distinta a las mencionadas anteriormente, se debe, marcar con una letra X seguida de un guión y un número consecutivo de acuerdo al grupo X.

X-2, X-3, X-5, etc.

1.4 Ejemplos de Aplicación.

Etiqueta Numerada FI-1

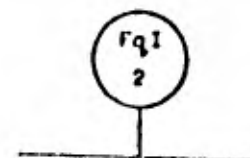
Indicador de Flujo montado localmente (Figura 1.17 a).



a)

Etiqueta Numerada FqI-2

Medidor de tipo turbina montado en la línea de proceso (Figura 1.17 b).



b)

Etiqueta Numerada FRCS-3

Controlador, registrador y totalizador de flujo montado en el tablero principal de instrumentos. (Figura 1.17 c)

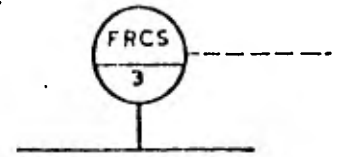
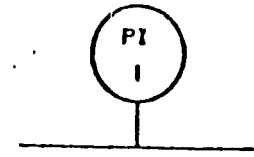


Figura 1.17 c)

Etiqueta Numerada PI-1

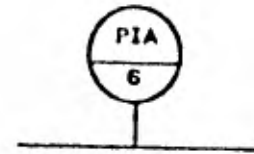
Indicador de presión o manómetro, montado localmente (Figura 1.18 a).



a)

Etiqueta Numerada PIA-6

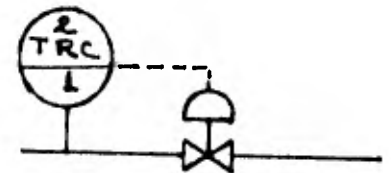
Indicador de presión de alarma, - montada en el tablero principal de instrumentos. (Figura 1.18 b).



b)

Etiqueta Numerada 2TRC-1

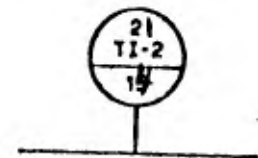
Controlador y registrador de temperatura de la unidad No. 2, montado en el - tablero principal de instrumentos. (Figura - 1.18 c).



c)

Etiqueta Numerada 21-TI-2-14

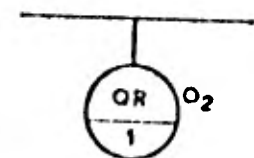
Punto de medición núm. 14 de indicador de temperatura de punto múltiple TI-2 de la unidad 21 montado en el tablero. (Figura 1.18 d).



d)

Etiqueta Numerada QR-1

Registrador de porcentaje de oxígeno montado en el tablero principal. (Figura 1.18 e).



e)

Etiqueta Numerada FRC-10 y PR-4

Controlador y Registrador de flujo con una segunda pluma que registra en PR-4 montado en el tablero principal. (Figura 1.18 f).

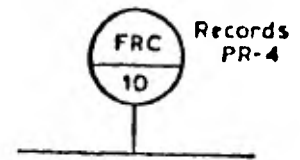
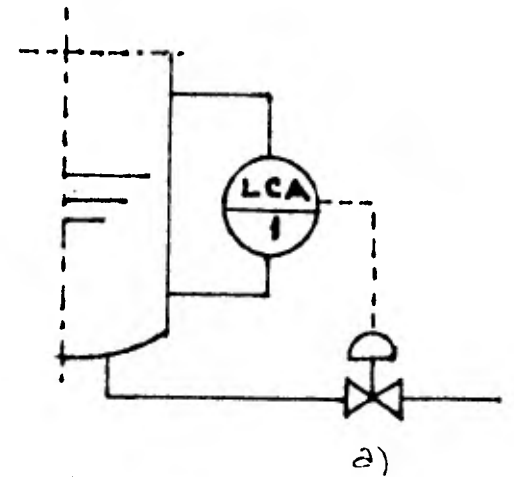


Figura 1.18 f)

Etiqueta Numerada LCA-1

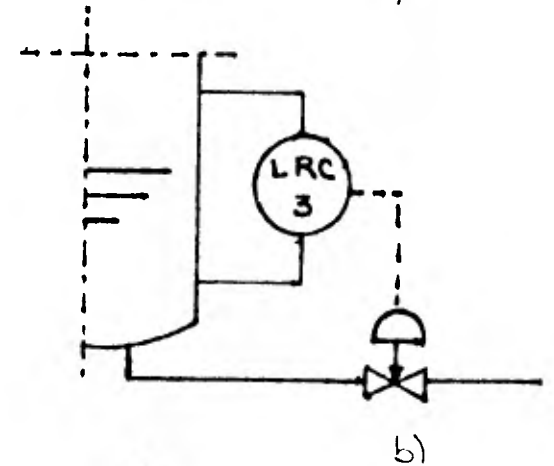
Controlador de nivel con alarma - montado en el tablero principal de instrumentos. (Figura 1.19 a).



a)

Etiqueta Numerada LRC-3

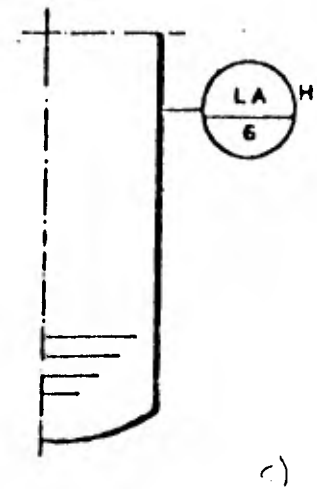
Controlador y registrador de nivel montado en un costado del depósito con el controlador y registrador montados localmente. - Figura 1.19 b).



b)

Etiqueta Numerada LA-6

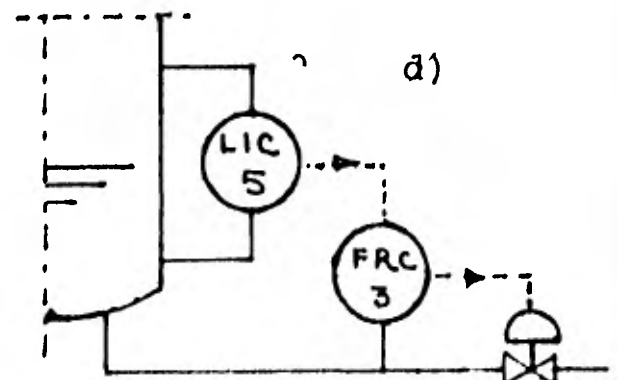
Alarma de nivel alto montada en el tablero principal. (Figura 1.19 c).



c)

Etiqueta Numerada LIC-5 y FRC-3

Control en cascada. El controlador e indicador del nivel LIC-5, ajusta el valor fijado del controlador y registrador de flujo FRC-3 ambos instrumentos se montan localmente. (Figura 1.19 d).



d)

1.4 Centro de Control.

Requerimientos de Información.

El objetivo principal del centro de control en una d,

planta es proporcionar la información requerida para la operación de los procesos, existen 3 usuarios principales de esta información: Los operadores, la gerencia y el equipo de control automático. El operador es responsable del funcionamiento de proceso bajo su supervisión y para lograr este objetivo, el operador debe de tener la información actualizada de todas las variables del proceso. Además de contar con alarmas las cuales llamen su atención: en las situaciones peligrosas, de daño potencial del equipo, de producto fuera de especificación y situaciones en las cuales se ponga en peligro el programa de producción de la planta. Por consiguiente el operador debe tener la información actualizada acerca de los controladores tal como: Los valores fijados, las constantes de ajuste y la salida de los controladores o la posición de las válvulas, algunas veces necesitará información de las tendencias de las variables del proceso y/o calcular las guías de operación basadas en los balances de materia y energía; adicionalmente necesita alguna información de operadores en otras partes de la planta, particularmente si aquellas porciones de la planta reciben o entregan material procesado en la parte de la planta, de la cual el operador es responsable.

El operador también requiere de información acerca de las metas del proceso, las posibilidades del equipo y los resultados del proceso derivados de sus decisiones.

La gerencia requiere información relativa de los resultados del proceso tales como: La rapidez de alimentación de las materias primas, la rapidez de salida de los productos y su calidad. Las utilidades y el costo de operación para fines de contabilidad. La evaluación del desarrollo del proceso y los estudios de Ingeniería, requieren esta misma información y frecuentemente alguna información adicional.

El equipo automático como el ser humano requiere tanto de información como de instrucciones, suponiendo un alto gra

do de automatización, el equipo requiere información de las entradas al proceso, los valores fijados de los controladores, además de información económica, límites de las alarmas, ajuste de los controladores y procedimientos de operación en casos de emergencia. A fin de que algunas unidades del proceso se puedan -- coordinar con otras, el equipo de control automático necesita información desde otros centros de control u otras partes del mismo centro de control cuando éste sea demasiado grande.

Funciones del equipo.

Otro de los propósitos importantes del centro de control es proporcionar los medios para el control del proceso. El control durante la operación normal es usualmente automático, la supervisión que se requiere para el equipo de control automático depende del nivel de automatización. El modo de control manual siempre es una opción disponible para el operador; otra opción, cuando se tiene un conocimiento abundante del proceso, es el control automático óptimo. Las operaciones de emergencia se pueden realizar manualmente o en forma automática, la tendencia de los operadores, es poner el proceso en el modo de control manual durante los imprevistos, ésto frecuentemente sacrifica uno de los propósitos importantes del equipo automático el cual es compensar los efectos de las perturbaciones. En virtud de que la confiabilidad del controlador y su capacidad se mejora en función del desarrollo de los algoritmos de control, la confianza del operador se incrementa y por consiguiente las mallas de control en modo manual cada vez son menos.

El procedimiento de arranque de la planta se puede obtener mediante la programación del control o manualmente. Las computadoras para control digital hacen posible automatizar todas las decisiones que deben de tomarse en el proceso de arranque.

Las interrupciones se pueden resolver de manera muy parecida a la forma en que se realizan los arranques. Aún cuando - las interrupciones son frecuentemente situaciones de emergencia, el procedimiento generalmente está mejor definido y muchos cuartos

de control tienen diagramas de flujo para las interrupciones de emergencia.

Presentación del Sistema.

Tablero Mímico.

La presentación ingeniosa de los instrumentos de indicación y registro, es necesaria en el diseño de los centros de control, donde frecuentemente el operador debe realizar operaciones del proceso, que son críticas o manejar una gran cantidad de datos. Los indicadores y los registradores deben de ser coordinados con controles, interruptores, alarmas y equipo auxiliar de manera tal que presenten de una forma clara y fácil de obtener las condiciones del proceso.

El desarrollo en los centros de control de procesos han involucrado a través de distintas etapas: El tablero totalmente gráfico, el tablero semigráfico con instrumentos de control montados separadamente, y el tablero semigráfico con instrumentos montados en armarios con unidades múltiples. Las plantas de proceso que emplean computadoras digitales para el control directo o el ajuste de los controladores, pueden tener una comunicación especial entre hombre-computadora a través de equipo de comunicación, instrumentos convencionales y estaciones de control de propósito especial, que conectan la computadora al proceso.

Tablero Totalmente Gráfico.

El tablero totalmente gráfico es esencialmente una representación mediante diagramas de flujo del proceso, trazada en el tablero de control con instrumentos miniatura montados en lugares adecuados del diagrama mismo. Esto presenta una gráfica clara y comprensiva de cada proceso y sus elementos de control en una relación global. Por lo que simplifica el entrenamiento del operador y puede reducir los errores por el hecho de confundir los instrumentos. Sin embargo, las desventajas de la presentación total-

mente gráfica, generalmente sobrepasan sus ventajas, dado que el gran espacio requerido por este tipo de tablero es costoso y se adiciona al costo del cuarto de control. Adicionalmente debe ser totalmente diseñado a las necesidades del cliente y cualquier cambio en la instalación original, es costoso; es difícil para el operador observar rápidamente todas las variables del proceso, particularmente en donde se agrupan varias unidades de proceso en un solo cuarto de control. Los tableros totalmente gráficos son poco usados en las plantas de proceso de reciente creación.

El Tablero Semigráfico.

Los tableros semigráficos proporcionan un mejor uso del espacio que el tablero totalmente gráfico. Los indicadores, los registradores, los controladores y el equipo auxiliar están agrupados juntos y tal como lo dicta el proceso. La porción gráfica del tablero esta usualmente a una escala menor y el diagrama de flujo se traza arriba de los instrumentos. Puede ser una línea manocromática simplemente o se pueden incluir colores y luces para localizar los instrumentos operativos, los interruptores y las válvulas en el diagrama.

La presentación semigráfica inicialmente utilizó instrumentos miniatura montados en lugares separados. La demanda de una mayor densidad de instrumentos en los tableros de control condujo al desarrollo de instrumentos de un frente angosto, posibilitando montarles en armarios para unidades múltiples.

Estas medidas han incrementado grandemente el número de instrumentos que un operador puede supervisar desde un mismo punto, también ha cambiado la fisonomía del cuarto de control. La creciente concentración de instrumentos ha hecho necesario utilizar anaqueles de equipo auxiliar para montar transductores, interruptores, anunciadores y dispositivos auxiliares.

En el caso de que una computadora digital se use en línea para controlar las mallas de control individuales en forma directa, el tablero de control contiene normalmente pantallas de control indicadoras, que conectan la computadora a la malla del proceso individual. Tales sistemas de control digital directo, normalmente tienen una pantalla de operación, con la representación digital y los medios para cambiar los parámetros del controlador de la malla, tanto en sus ajustes como en el valor fijado.

INSTRUMENTACION DE LOS PROCESOSINTRODUCCION

Los procesos industriales modernos tienen un alto grado de automatización debido a las elevadas metas de producción y a la complejidad de los procesos. La medición de las variables de proceso mediante instrumentos electrónicos y neumáticos hace posible enviar esta información al cuarto de control, donde el operador o una computadora, toman la decisión de como modificar el estado del proceso a fin de mantener la calidad del producto o el índice de producción.

Las variables más comunes en la industria son el flujo, el nivel, la presión y la temperatura. Los instrumentos empleados en la medición de estas variables presentan una estructura similar compuesta por: una etapa de entrada, una etapa de amplificación y una etapa de salida.

La etapa de entrada se compone de un transductor y el circuito complementario, que traduce la variable física en cuestión a una señal eléctrica, mecánica o neumática más fácilmente medible. La etapa de amplificación aumenta el nivel de la señal de entrada y la procesa para eliminar señales de ruido inducido, finalmente en la etapa de salida se dispone de elementos para la indicación, control y/o registro de la variable física.

En este capítulo se presentarán los principios de funcionamiento de los instrumentos de proceso, así como sus ventajas y limitaciones.

2.1 Medición de Flujo.

El flujo se mide normalmente mediante instrumentos de desplazamiento positivo o instrumentos medidores de la velocidad

del fluido. El instrumento de desplazamiento positivo funciona midiendo un volumen conocido cada vez y contando el número de veces que se llena ese volumen en la unidad de tiempo. El esquema de un medidor de este tipo se presenta en la figura - 2.1.

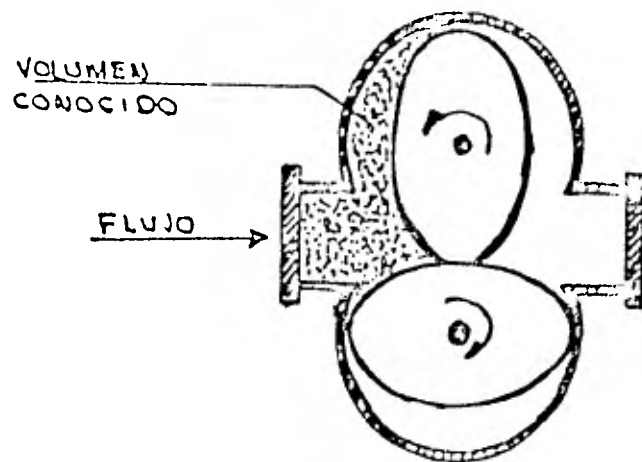


Figura 2.1 Medidor de Flujo de Desplazamiento positivo.

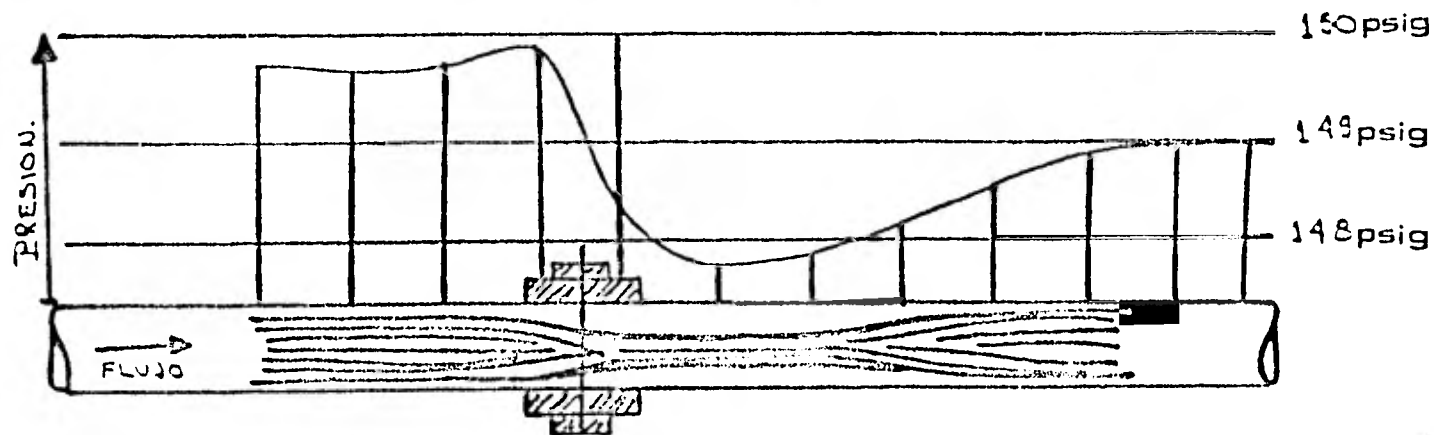
Un medidor de velocidad de flujo no separa el fluido en volúmenes aislados y el fluido atraviesa el dispositivo de medición en forma continua. Los instrumentos más difundidos para la medición de flujo son:

- Tubo pitot
- Codo
- Area variable
- Turbina
- Remolino
- Magnético
- Sónico

Medidores de tipo presión diferencial.- Estos instrumentos tienen un elemento primario que es una restricción en la tubería, para reducir el área de flujo y aumentar la velocidad del fluido según la expresión:

$$v = \sqrt{q/A}$$

De acuerdo al teorema de Bernoulli un incremento en la velocidad produce una caída de presión con relación al cuadrado de la velocidad, por lo cual si medimos la presión antes y después del orificio, se tendrá el valor del flujo elevado al cuadrado. Observece en la figura 2.2 que se tiene una caída de presión permanente cuando se usa la placa de orificio.



2.2 Perfil de la caída de presión producido por una placa de orificio.

La relación entre el flujo y la caída de presión es:

$$W = \sqrt{\frac{2gc(P_1 - P_2) \rho_1}{1 - \beta^2}}$$

para números de Reynolds mayores de 30 000 el coeficiente de descarga se aproxima a 0.6

Tubo Venturi.- El tubo venturi consiste en una reducción de tubería, lograda con un tramo recto, un cono de entrada, la garganta y el cono de salida.

El tubo venturi se recomienda en casos donde el flujo es grande y se requiere una baja caída de presión, o bien en fluidos altamente viscosos. Su precisión es la mejor dentro de los elementos de presión diferencial, pero su elevado costo es una razón que limita su utilización.

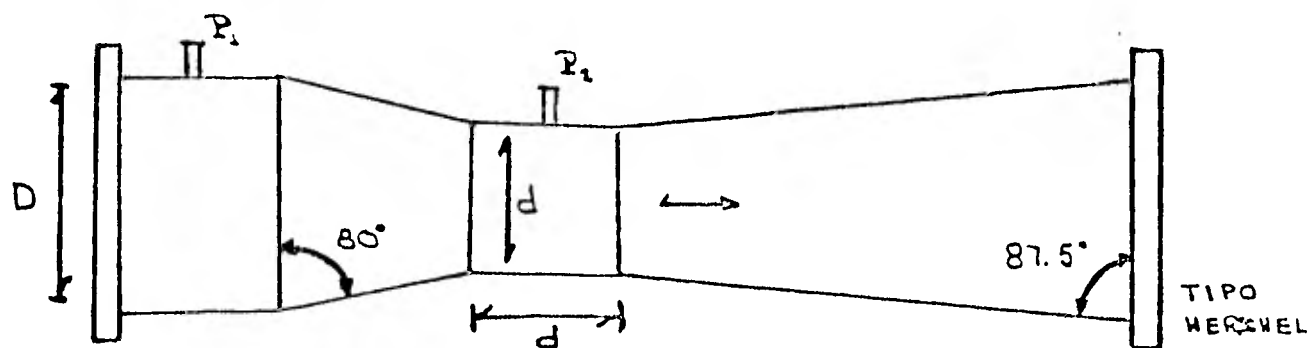


Figura 2.3 Tubo venturi.

Existen variaciones del tubo venturi, que tienden a disminuir la pérdida de presión permanente, éstos son llamados tubos de Baja-Pérdida, como son el tubo Dall y el tubo Foster.

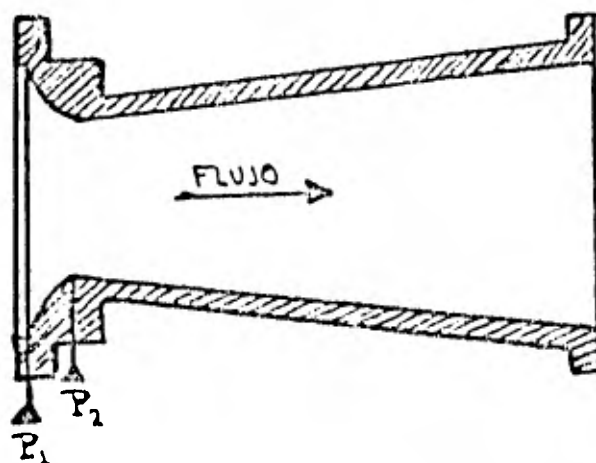


Figura 2.4 Tubo dall.

Tubo Pitot. Es un instrumento efectivo sobre todo para mediciones de laboratorio o para mediciones de prueba, pero su tendencia a taparse con fluidos no muy limpios, y sus limitaciones en cuanto al rango de velocidad lo hacen poco usual. Su gran ventaja es la facilidad de instalación, aunado a esto está el hecho de no representar para el flujo ninguna pérdida de presión.

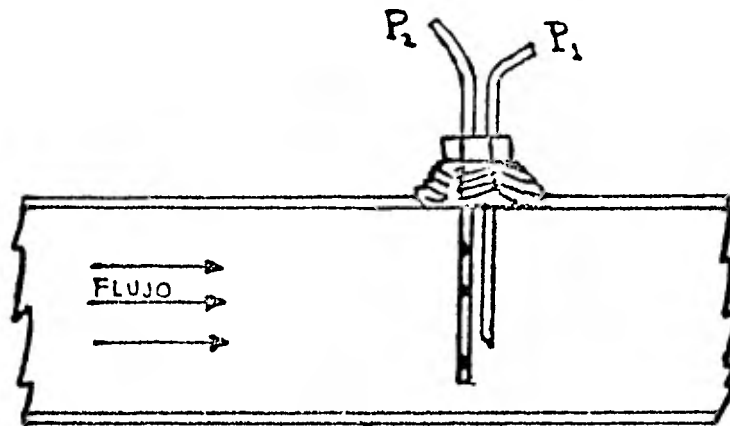


Figura 2.5 Tubo de pitot.

El tubo pitot tiene dos tomas de presión, una de ellas intercepta una pequeña parte del flujo, mediante pequeñas perforaciones en un tubo delgado, con esto la presión -- ejercida sobre los orificios se debe a la presión cinética más la presión estática. La otra toma se hace perpendicular al eje de flujo, de tal manera que sólo se presenta la presión estática.

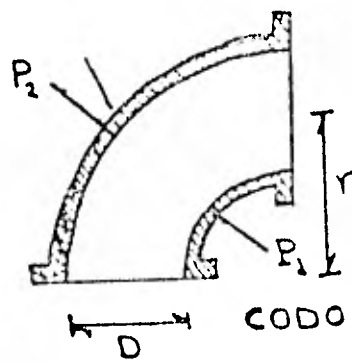
La diferencia entre estas dos presiones, es la presión cinética, que es una función de la velocidad y por ende del gasto.

$$W = K_p \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{\gamma}} D^2 \quad (K_p: \text{constante de proporcionalidad})$$

Codo.- La fuerza centrífuga de un fluido pasando por un codo de tubería puede ser aprovechada para proporcionar una medición de flujo. Pudiéndose estimar con la ecuación siguiente:

$$W = K_c \sqrt{\frac{r}{D} \frac{P_2 - P_1}{\gamma}} D^2$$

K_c : constante de proporcionalidad
 r : radio de curvatura del codo.

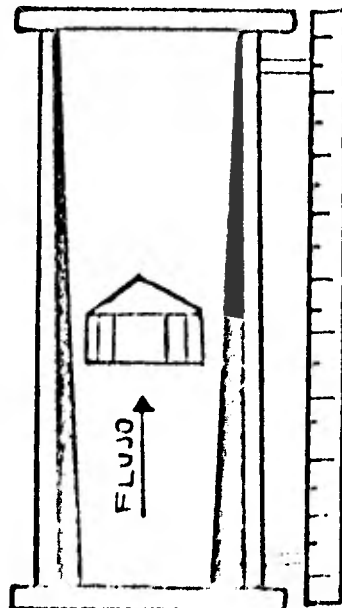


La limitación más grande del codo como instrumento de flujo es la pequeñísima diferencia de presiones que genera, insuficiente para su medición práctica.

Su ventaja es que cualquier codo en la tubería puede aprovecharse, por lo que resulta un instrumento económico.

Medidores de Area Variable.- Entre este tipo de instrumentos se encuentra el rotámetro que consiste en un tubo vertical cónico, por el cual se hace pasar el fluido a medir en dirección ascendente. Un "flotador", ligeramente más denso que el fluido, crea un paso anular entre él y la pared interior del tubo. Al variar el flujo el flotador baja o sube variando el área de flujo, hasta lograr que la presión diferencial a través del flotador equilibre su peso. La posición es entonces una indicación del flujo.

Si el fluido es transparente y el tubo es de vidrio, se tiene un indicador de flujo más sencillo. En los casos donde el flotador no puede ser visible, se puede utilizar un seguidor magnético para medir la posición del flotador (ferromagnético). Este artificio no es muy común, puesto que se pierde la --ventaja principal del rotámetro, su sencillez.



Los medidores de área variable son los más usuales para medir flujos bajos, desde $0.5 \text{ cm}^3/\text{min.}$ a 300 gpm de líquido o desde $30 \text{ cm}^3/\text{min.}$ hasta 1000 scfm de gas en rotámetros hasta de 3".

Aunque existen medidores de área variable en tamaño mayores a 3", se prefieren para tuberías de 4" o mayores, -- otros tipos de instrumentos por ejemplo, una placa de orificio.

Medidores de Tipo "BLANCO".- Este tipo de instrumentos consta fundamentalmente de un disco circular colocado en el centro de la tubería, de tal modo que se forma un orificio anular entre el disco y la tubería; esto produce una diferencia de presión, a los lados del disco, proporcional en -- raíz cuadrada al flujo. La diferencia de presión produce una fuerza de empuje resultante, y es esta fuerza la que se aprovecha como medición de flujo.

Para medir la fuerza se utiliza un instrumento de -- "balance de fuerzas", cuya salida puede ser una señal neumática o electrónica.

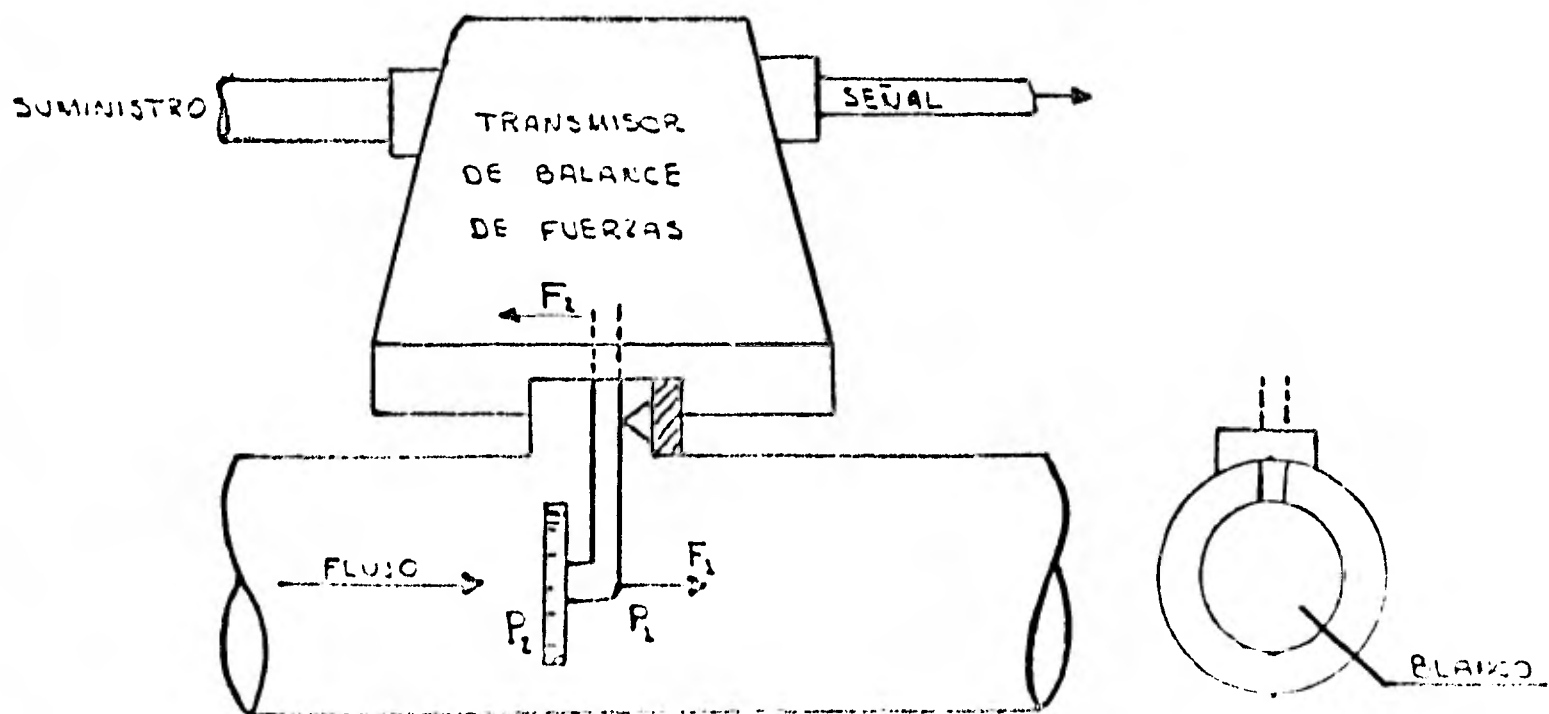


Figura 2.7 Medidor tipo "Blanco".

Medidor de Tipo Turbina.- Este instrumento consiste en una rueda de turbina o un hélice colocada directamente en la corriente de la tubería.

El paso del fluido produce una fuerza sobre las aspas de la rueda, y ésta comienza a girar. La velocidad de giro es pues la medición del flujo.

La velocidad de la rueda es detectada por una cabeza magnética colocada cerca de las aspas, pero fuera de la tubería. El paso de cada una de las aspas produce un corte de líneas de flujo magnético, induciendo un pulso de voltaje en el embobinado del detector magnético. La frecuencia de estos pulsos es la medición del flujo.

El problema más fuerte de estos instrumentos es que tienen partes en movimiento.

Medidores de Tipo Remolino.- Recientemente han entrado al mercado los medidores de remolino, que están basados en un fenómeno natural.

Cuando un fluido atraviesa una restricción, se forman líneas de flujo alrededor del obstáculo, y si ésta no sigue la forma hidrodinámica de las líneas de flujo, éstas no pueden seguir el contorno del obstáculo corriente abajo. Por lo que se forma un remolino.

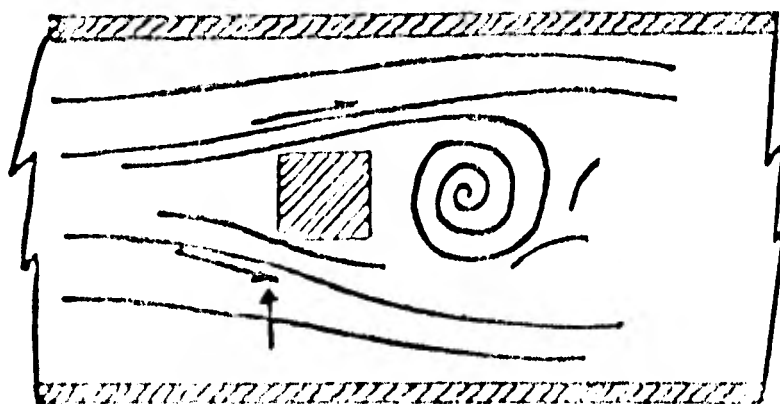


Figura 2.8 Medidor de Flujo Tipo Remolino.

Cuando un remolino se forma en un lado del obstáculo, la velocidad del líquido aumenta y la presión disminuye, en el lado opuesto la velocidad disminuye, aumentando la presión. Con lo que aparece una presión resultante y alternante sobre las caras laterales del obstáculo.

La frecuencia de los cambios de presión es aprovechada para inferir la medición de flujo.

Medidores Tipo Magnético.- Según la Ley de Faraday, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, aparece una diferencia de potencial. En la mayoría de las máquinas eléctricas, el conductor es un alambre, pero el principio es aplicable también para un fluido conductor de -electricidad.

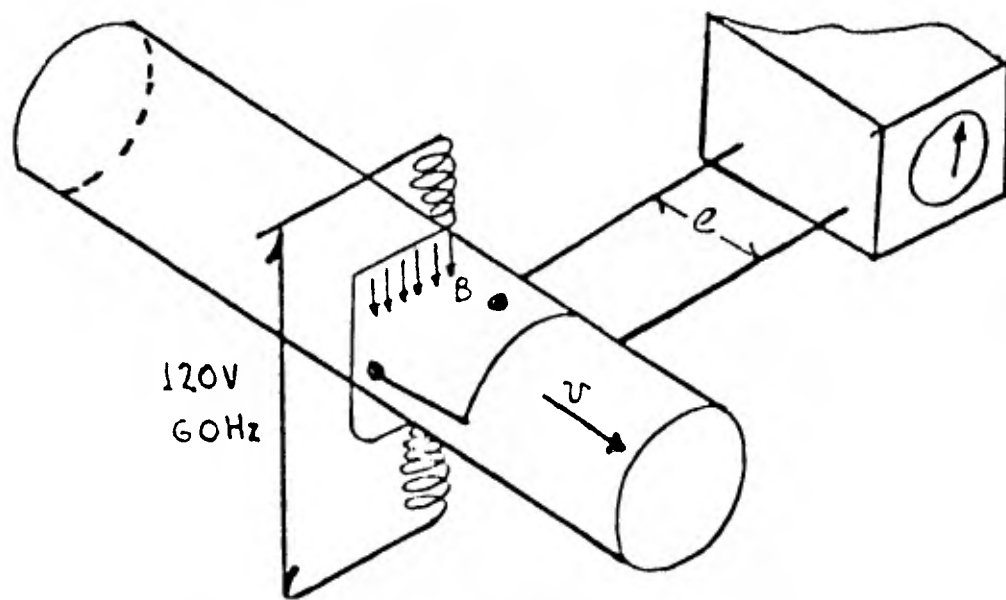


Figura 2.9 Medidor de Flujo Tipo magnético.

El medidor magnético de flujo consiste en un tubo aislante, con un par de electrodos opuestos.

Un campo magnético transversal se produce por dos embobinados alimentados con c.a., situados a 90° de los electrodos.

CARACTERISTICA	ORIFICIO	DESP. POSITIVO	MAGNETICO	TURBINA	REMOLINO	AREA VARIAB.
Precisión	$\pm 1\%$	$\pm 0.25\%$	$\pm 1\%$	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 2\%$
Rango de Flujo	4 : 1	15 : 1	10 : 1	10 : 1	12 : 1	10 : 1
Mínima Velocidad	Varía	0.3 mt/s	0.06 mt/s	1 mt/s	$R_d=10,000$	Varía
Máxima	Varía	15.0 mt/s	60 mt/s	35 mt/s	35 mt/s	Varía
Pérdida de Pres.	Grande	Mediana	Ninguna	Baja	Mediana	Baja
Tamaños	1" mín	1" - 6"	1/8" - 72"	3/16"-24"	2" - 6"	Hasta 3"
Calibración	No re- quiere	Requiere	Requiere	Requiere	no re- quiere	no re- quiere
Salida	Análogica	Digital	Análogica	Digital	Digital	Local
Servicio	$\sqrt{\quad}$ Gas o lí- quido	Gas o lí- quido	Líquido	Gas o lí- quido	Líquido	Gas o lí- quido
Costo 2" (C/Trans) 6"	1 (refer) 1 (refer)	1.2 3.2	1.6 2.0	0.8 1.5	0.8 0.9	0.25 -
Tubería Recta	15/60D(a)	5 D (a)	5 D (a)	10 D (a)	10/30 D (a)	cero (a)
Tubería Recta	5 D(d)	cero (d)	cero (d)	5 D (a)	5 D (a)	cero (d)

5-16 Tabla comparativa de Instrumentos de Flujo

(a) Antes del elemento

(d) Después del elemento

El voltaje generado en los electrodos es utilizado como una medida proporcional al flujo.

Estos instrumentos son muy comunes en aplicaciones de fluidos difíciles de manejar, pero están limitados a fluidos conductores (no es aplicable a gases).

2.2 Medición de Nivel.

Dentro de los procesos industriales, la medición y el control de nivel se hace necesario cuando se pretende tener una producción continua, cuando se desea mantener una presión hidrostática, cuando un proceso requiere de un volumen - para llevarse a cabo satisfactoriamente o bien, el caso más simple, evitar que un líquido se derrame.

Existe una gran variedad de instrumentos de nivel, desde los visuales, hasta los sofisticados métodos radioactivos. Se pueden clasificar en grupos según su principio de operación.

La medición de los instrumentos de desplazador y los de presión hidrostática varían proporcionalmente con el nivel y con la densidad del fluido, por lo que también son utilizados para la medición de esta propiedad de los líquidos.

Regleta.- En un tanque abierto se puede introducir una escala graduada con objeto de tener una medición indicativa del nivel, según se aprecia en la figura 2.10 a.

Columna de Vidrio.- En este caso, la indicación puede ser de un tanque cerrado y presurizado, puesto que la medición se realiza en una columna conectada al tanque en dos puntos. Este indicador es muy usual y es común encontrarlo junto con algún instrumento transmisor de nivel, puesto que su precisión lo hace patrón de calibración. En la figura 2.10 b se muestra un sistema de este tipo.

Existen dos tipos de columnas: la "transparente" y la "reflejante", ésta última se utiliza para líquidos transparentes e incoloros, puesto que su construcción permite tener un gran contraste visual.

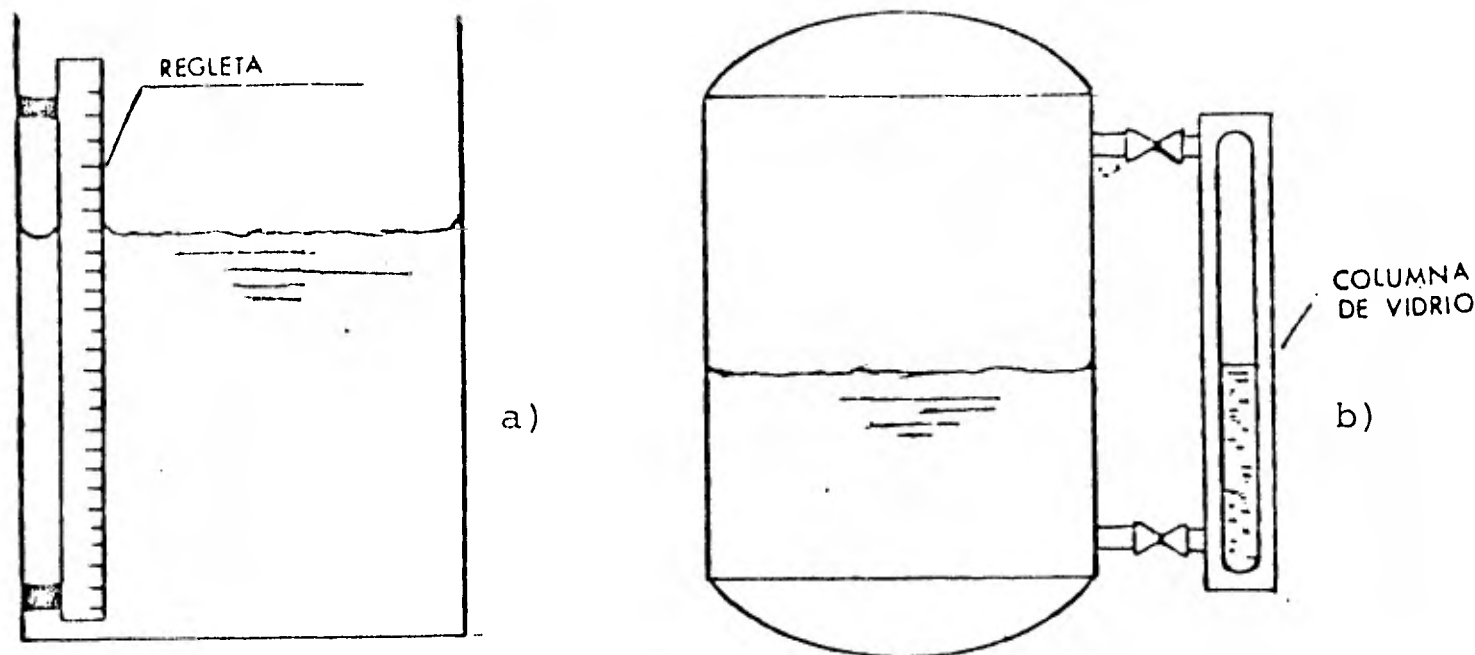


Figura 2.10 Sistemas visuales para medición de nivel.

Medidores de Flotador y Palanca.- Este tipo de instrumentos utiliza un cuerpo hueco e impermeable, el cual flota sobre la superficie del líquido variando así su posición, de acuerdo a los cambios de nivel.

Los medidores de flotador y palanca utilizan los movimientos del flotador para actuar un indicador (o un transmisor de balance de movimiento), por medio de palancas; por lo que su rango está limitado por la dimensión de brazo de palanca. Un sistema típico aparece en la figura 2.11 a.

Son muy frecuentes en aplicaciones donde se requiere un valor prefijado de nivel para accionar un interruptor, tal como se muestra en la figura 2.11 b.

Existen flotadores internos y flotadores externos, és

tos últimos son empleados en tanques a presión, puesto que pueden ser removidos sin afectar el proceso.

En ciertas aplicaciones es común encontrarlos actuando directamente a una válvula de control.

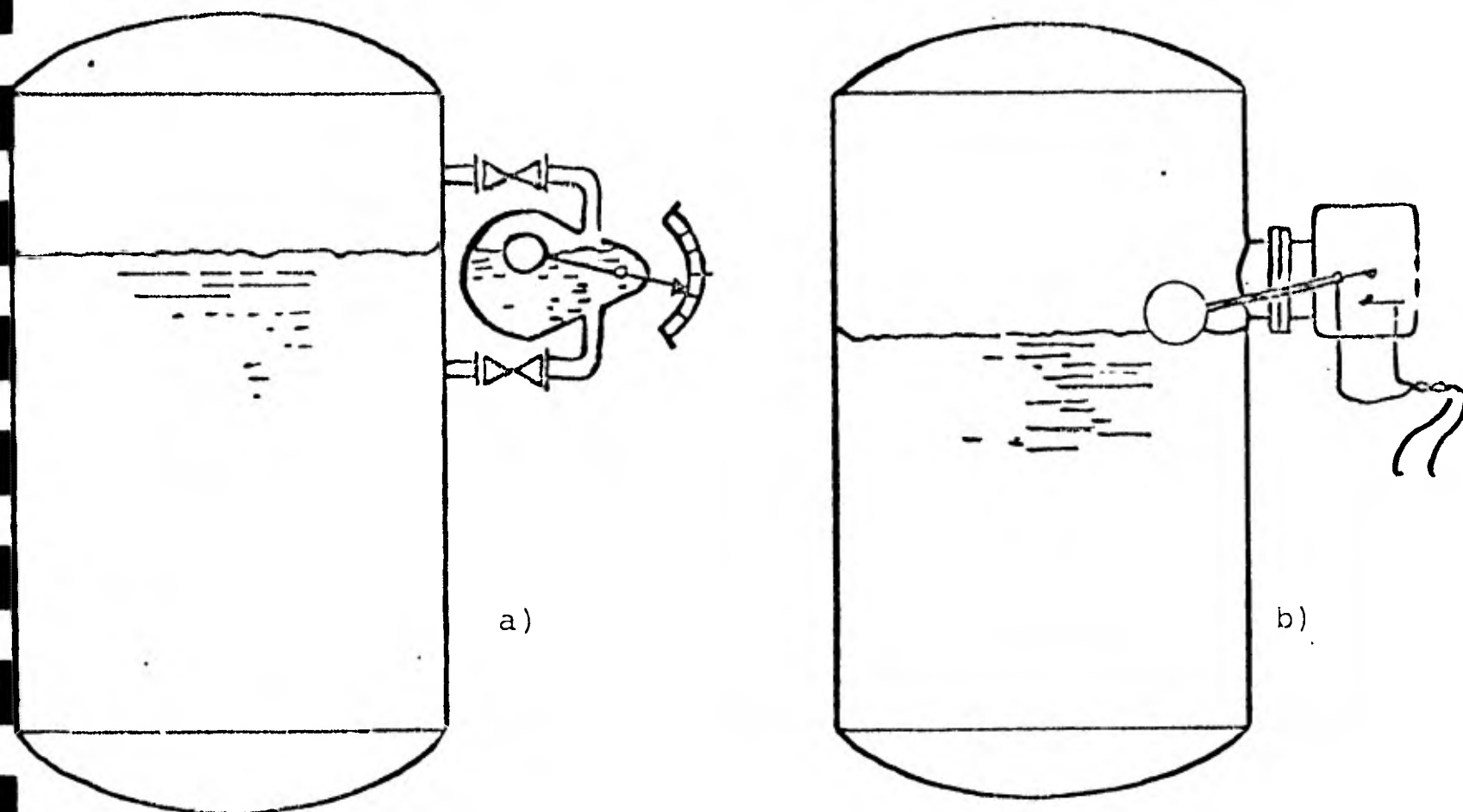


Figura 2.11 Sistemas de medición de flotador y palanca a) el flotador acciona el indicador b) el flotador acciona un interruptor.

Flotador y Cinta.- En este caso el flotador actúa el mecanismo indicador por medio de una cinta que se enrolla sobre un carrete cilíndrico, un contrapeso mantiene tensa la cinta (en algunos casos el contrapeso es substituído por una cuerda de reloj).

Para este tipo de instrumentos de flotador, el rango de medición ya no es una limitación.

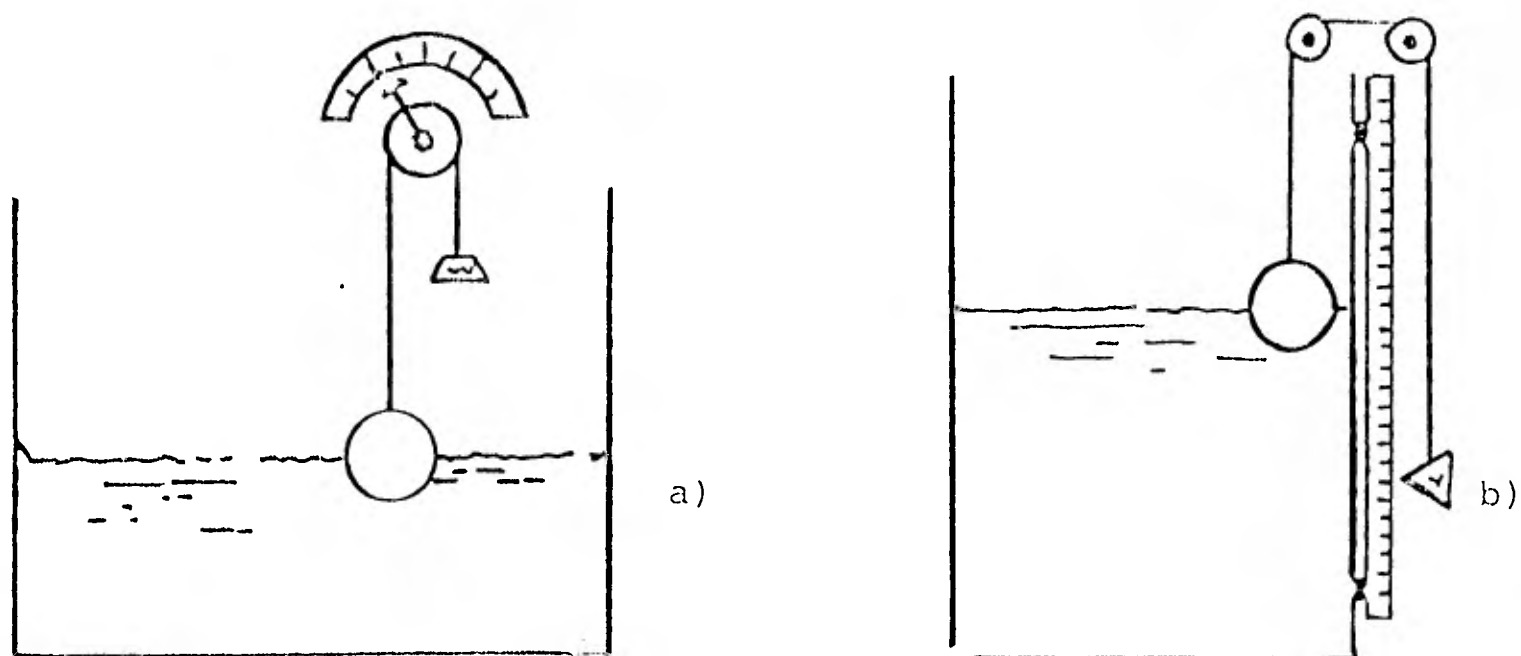


Figura 2.12 Sistema de medición de nivel tipo flotador y cinta a) montaje interior b) montaje exterior).

Medidores de Desplazador.- De acuerdo con el principio de Arquímedes, cuando un cuerpo es sumergido, total o parcialmente, en un fluido, aparece una fuerza ascendente igual al peso del volumen del líquido que desplazó. Los medidores de desplazador constan de un tubo metálico cerrado, de aproximadamente 2" de diámetro y de una longitud tal que cubra el rango de nivel por medir. Este tubo llamado "desplazador" es sumergido en el tanque (o en una cámara comunicada al tanque por válvulas), por lo que al variar el nivel, varían también el volumen del líquido desplazado y con esto aparece una variación en la fuerza sobre el desplazador.

La fuerza es sentida por un transmisor de balance de fuerzas y puede ser convertida a una señal neumática o eléctrica.

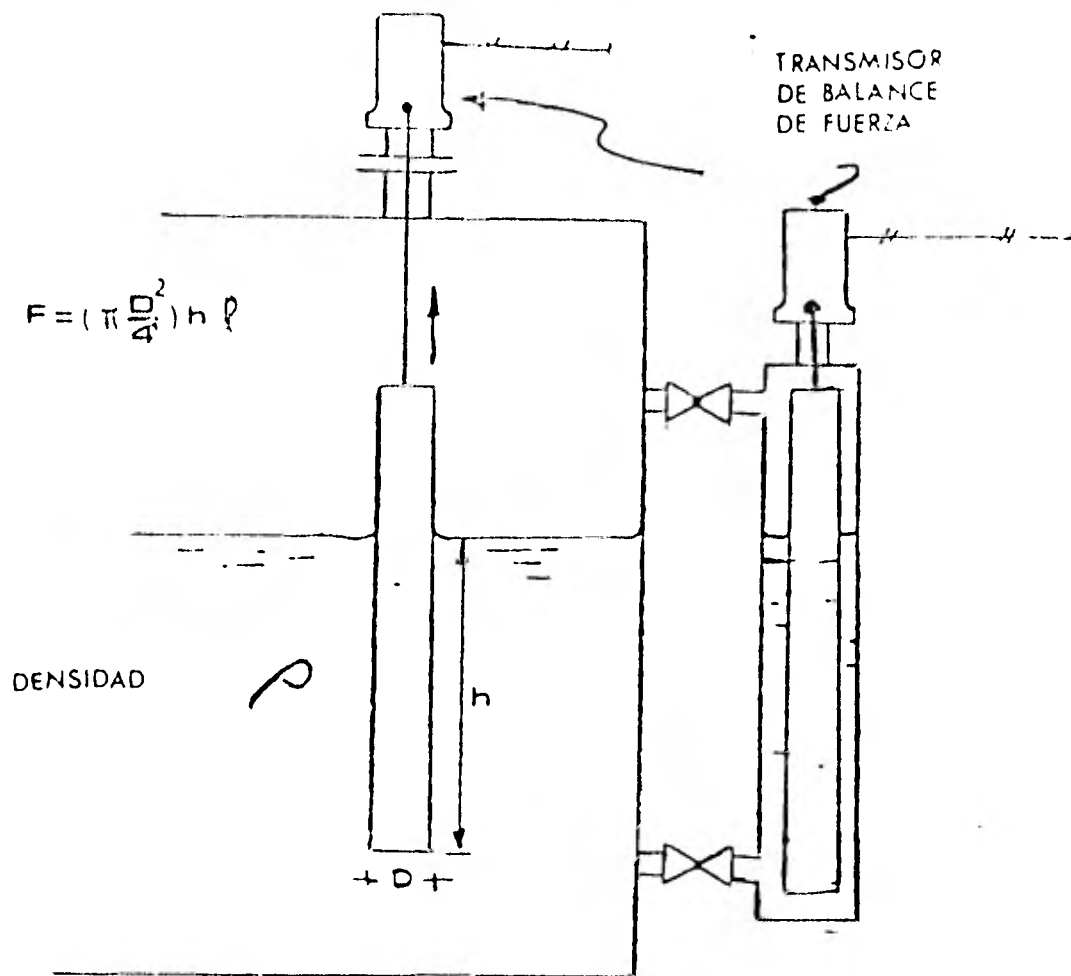


Figura 2.13 Sistema para medición de nivel tipo desplazador.

La longitud de los desplazadores varía de acuerdo con los fabricantes, pero generalmente son de 14", 32", 48" y 60". Para rangos de nivel mayores de 60" el instrumento de desplazador deja de ser recomendable, y se prefieren entonces los de presión hidrostática, aunque existen desplazadores hasta de 180".

Una de las ventajas del desplazador sobre el flotador, se debe a que no tiene partes en movimiento. El rango de los desplazadores es mayor que el de los sistemas de flotador y palancas.

Para aplicaciones en donde el líquido es muy viscoso y

viscoso, los instrumentos de flotador y los de desplazador pueden presentar problemas, por las adherencias que acumule el -- flotador o desplazador.

Es común hallar medidores de desplazador como instrumentos de DENSIDAD. Si el desplazador está totalmente sumergido, los cambios de la fuerza de flotación son debidos únicamente a la densidad del líquido. En esta aplicación el volumen del desplazador se puede hacer más grande, si el rango de densidad es pequeño, con objeto de tener más fuerza de flotación. Un arreglo de este tipo se presenta en la figura 2.14.

$$F = \pi \frac{D^2}{4} H \rho$$

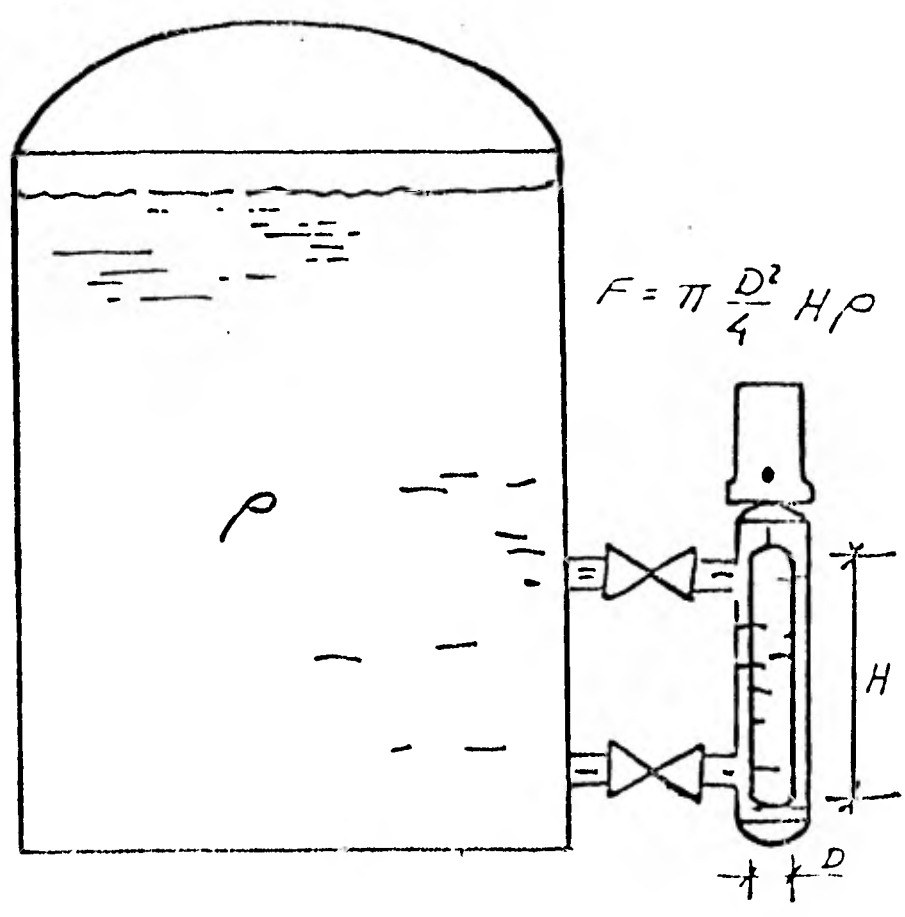


Figura 2.14 Medidor de desplazador utilizado para medición de Densidad.

Es posible también utilizar los desplazadores para medir nivel de interfase entre dos líquidos de distinta densidad,

sumergido totalmente el desplazador, la fuerza que recibe es:

$$F = (D^2/4) (h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2)$$

Donde:

h_1 = longitud del flotador cubierta por líquido 1

h_2 = longitud del flotador cubierta por líquido 2

ρ_1 = densidad del líquido 1 (conocida)

ρ_2 = densidad del líquido 2 (conocida)

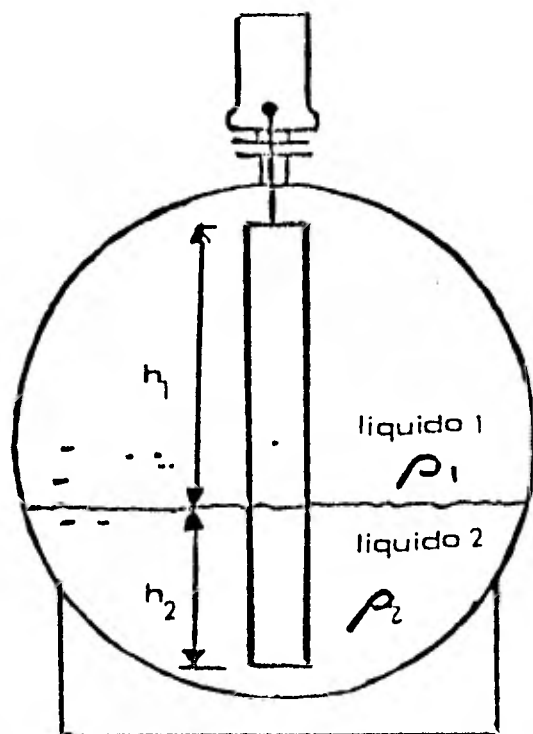


Figura 2.15 Sistema de medición de nivel tipo desplazador utilizado para medir interface entre líquidos.

Medidor de burbujeo.- Los sistemas de burbujeo o de purga continua, realizan la medición de nivel, midiendo la presión requerida para que un flujo constante de aire venza la presión hidrostática de un líquido, hasta salir de un conducto. Como el flujo necesario es muy pequeño, al salir el aire lo hace a manera de burbujeo, de ahí el nombre del sistema.

Para realizar la medición se introduce un tubo hasta el nivel mínimo de operación, a este tubo se le conecta un tubo

nistro de aire por medio de un regulador de flujo constante. Por lo que se crea una presión en el tubo hasta que empieza el burbujeo.

La presión en el tubo es igual a la presión hidrostática causada por el nivel, de manera que si se mide la presión del tubo, se tendrá una medición del nivel.

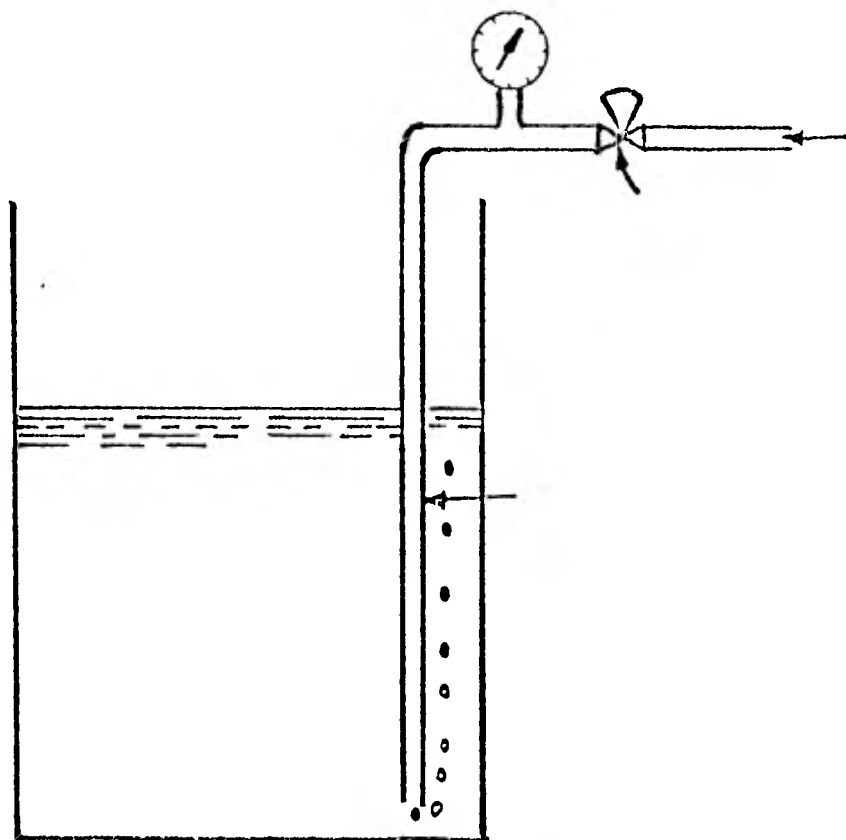


Figura 2.16 Sistema para medición de nivel de tipo "Burbujeo".

El sistema de burbujeo no es apropiado para tanques cerrados, porque el aire que entraría aumentaría la presión y la medición será falsa.

La ventaja de este sistema es que una vez iniciado el flujo, el instrumento de presión (indicador o transmisor) no está en contacto con el fluido, por lo que es útil en casos de fluidos corrosivos.

También es útil cuando se trata de medir nivel de cisternas o en donde no se tiene acceso lateral al recipiente.

Medidores de Presión Diferencial.- Este tipo de instrumentos son quizás los más comunes en la medición de nivel tanto para tanques abiertos, como cerrados. La presión debida a la columna hidrostática puede ser medida por instrumentos de balance de movimiento o de balance de fuerzas, los primeros son generalmente usados cuando se requiere de una indicación local, y los de balance de fuerzas cuando es necesaria la transmisión de una señal, ya sea neumática o electrónica.

Las tomas de presión diferencial se hacen: una en la parte inferior del tanque, por medio generalmente, de una conexión bridada, y la otra en la parte superior del tanque - cuando se trata de recipientes a presión (cuando son atmosféricos, la toma de baja presión se ventea a la atmósfera).

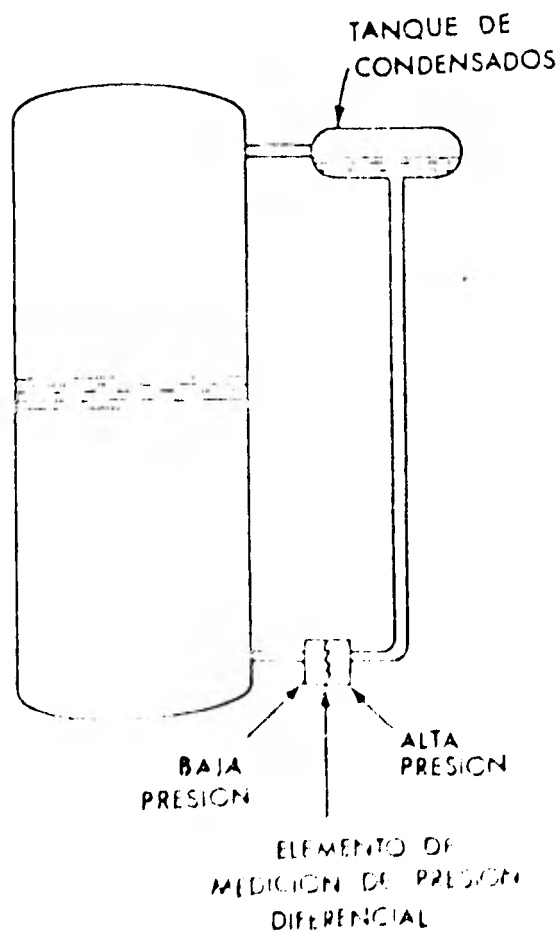


Figura 2.17 Sistema de medición de nivel de tipo "presión diferencial".

Electrodos de Conductividad.- Si se desea controlar el nivel de un líquido entre puntos determinados, o bien se requiere de una alarma, se puede utilizar un medidor eléctrico de conductividad. Consta de un par de electrodos (uno de los electrodos puede ser el recipiente) dispuestos verticalmente y separados entre sí.

Cuando el líquido toca ambos electrodos se establece una corriente, la cual puede actuar una alarma, un motor o una solenoide. Su costo es bajo, su mantenimiento e instalación son fáciles, pero no es aplicable para fluidos inflamables por posibles arcos eléctricos.

Medidores de Nivel Tipo Capacitancia.- La capacitancia entre dos conductores separados por un dieléctrico depende del área efectiva entre los conductores, de su separación y de la constante dieléctrica. Cuando se sumergen dos electrodos en un líquido, éste actúa como dieléctrico, y el área efectiva es sólo la que está en contacto con el líquido.

Introduciendo dos barras metálicas en un recipiente con líquido, se formará un capacitor cuya capacitancia dependerá del nivel del líquido. Por lo que si se mide el valor de la capacitancia, se tendrá una medida proporcional del nivel.

En este tipo de instrumentos la medición no se afecta por la densidad o por la presión. Otra característica importante del medidor por capacitancia es su fácil instalación y su poco mantenimiento.

Su precio es alto, pero si las condiciones de operación son difíciles, pueden ser un instrumento recomendable. - No es aplicable en líquidos que contengan burbujas en exceso.

2.3 Medición de Presión.

Presión.- Es la fuerza ejercida por un medio sobre la unidad de superficie. La presión se mide como una fuerza por unidad de área ejercida en un punto dado. Difiere del esfuerzo normal sólo en la forma de aplicación.

La presión es una medida de la cantidad de material contenida dentro de un recipiente y muy frecuentemente tiene efecto directo en las características importantes de los productos.

Los instrumentos para medición de presión pueden clasificarse según su principio de operación por: el peso de una columna de líquido, la deformación de una cámara de presión elástica y en dispositivos sensores eléctricos.

A continuación se presentan los tipos de medición de presión más comunes en la industria.

Presión absoluta.- Es la presión medida tomando como referencia la presión cero.

Presión manométrica.- Es la presión medida tomando como referencia la presión ambiental o atmosférica.

Presión barométrica.- Es la presión ambiental o atmosférica ejercida por la atmósfera terrestre en un lugar específico del planeta.

Presión diferencial.- Es la diferencia entre dos puntos de medición de presión. Es una medida referida a una presión de referencia o a un rango de presiones de referencia.

Presión estática.- Es la presión de un fluido que se ejerce de forma normal a la dirección en que fluye un fluido.

Presión dinámica.- Es la presión de un fluido en movimiento ejercida paralelamente a la dirección del mismo debido a la velocidad del fluido. -- También se le llama presión de impacto o presión de velocidad.

Presión de estancamiento.- Es la suma de la presión estática y la presión dinámica. También se le conoce como presión total.

Presión cabeza.- Es la altura de la columna de un líquido a la base de la cual se deberá desarrollar una presión dada.

Presión parcial.- Es la presión ejercida por un elemento constituyente de una mezcla de gases.

Vacio.- Es la presión reducida a un mínimo prácticamente alcanzable en un volumen o región del espacio. El vacío perfecto es la presión absoluta cero y la ausencia completa de cualquier materia.

En las figuras 2.19 y 2.20 se muestran algunas relaciones entre los conceptos establecidos.

Tubo de bourdon.- El tubo de bourdon básico (fig. 2.21 b) es un tubo de sección transversal ovalada (elíptica),

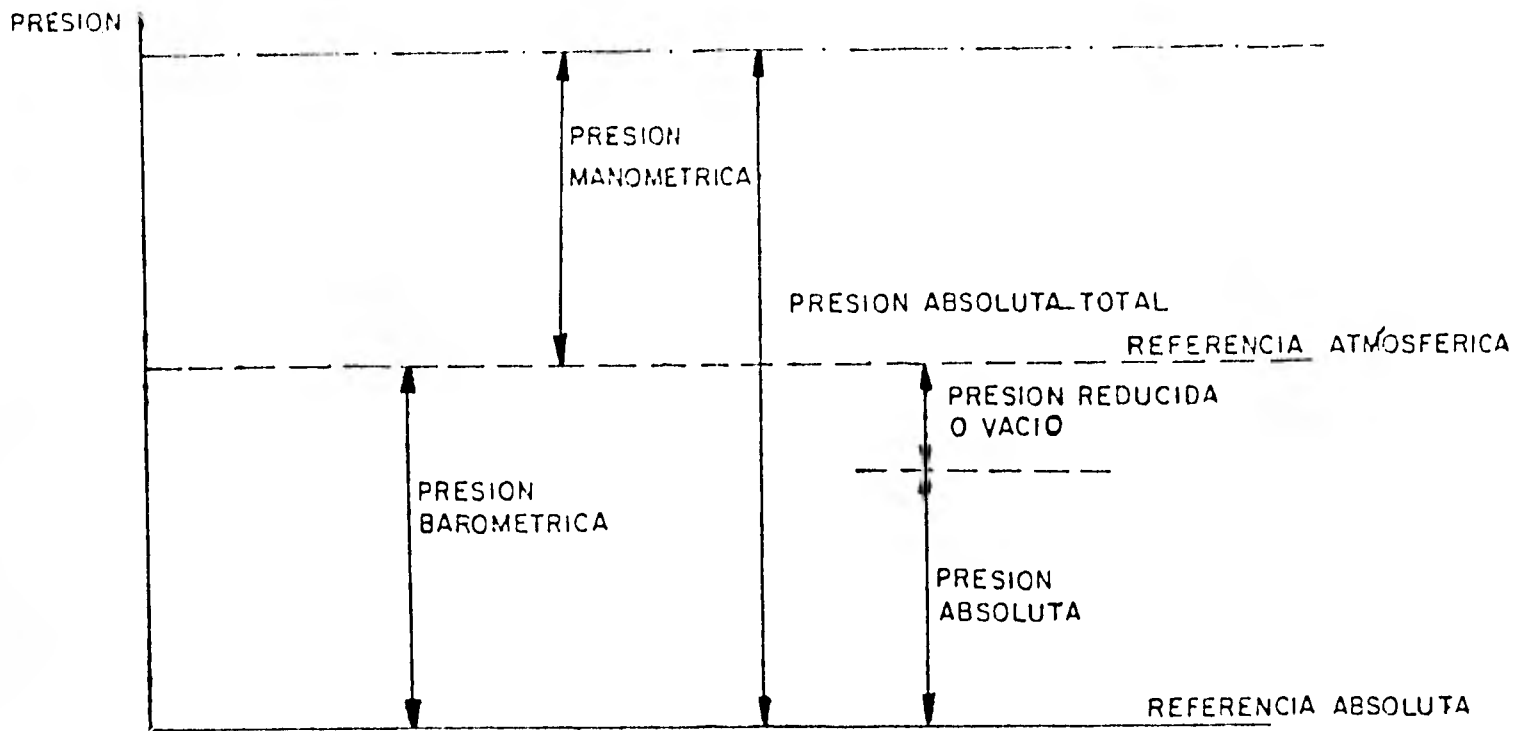


Figura 2.19 Relaciones entre presión absoluta, manométrico y barométrica.

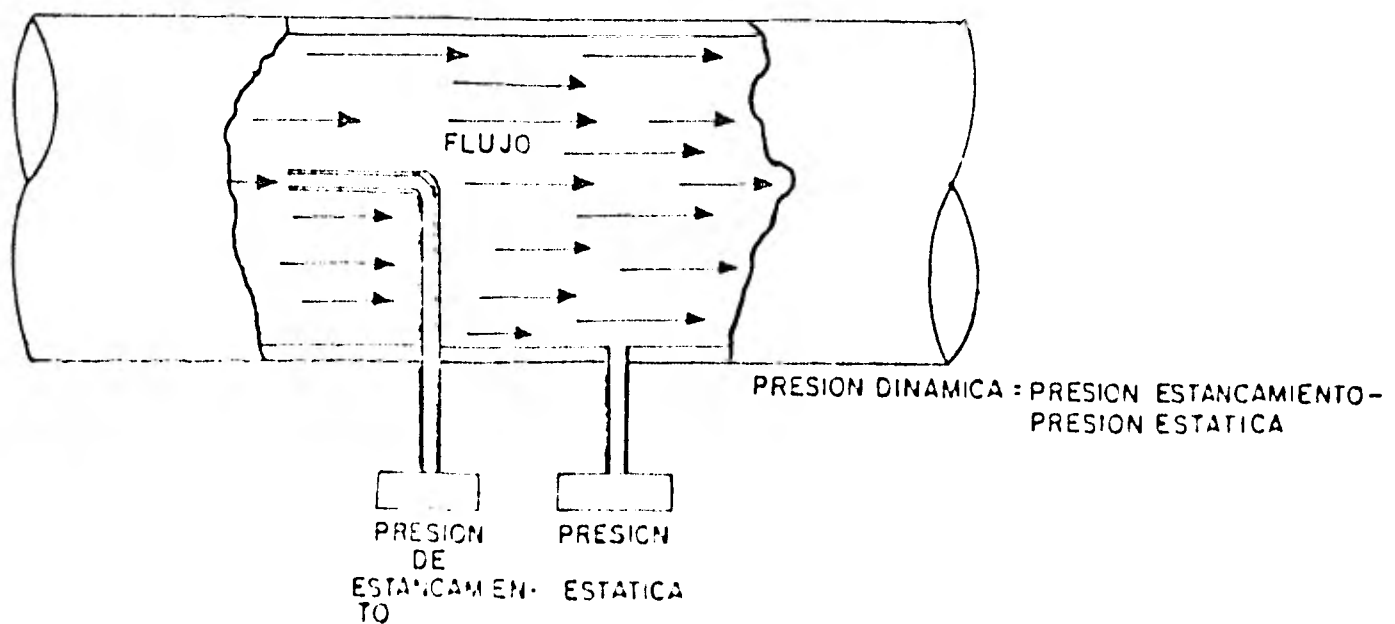


Figura 2.20 Relación entre presión de estancamiento y presión estática.

sellado en uno de sus extremos. Sobre el eje longitudinal - presenta una forma de C. Cuando al tubo se le aplica una presión interna, tiende a adoptar su forma recta original, la -- cual provoca un movimiento angular en el extremo sellado, que es función de la presión aplicada. El nombre "bourdon" obedece a que fué el francés Eugene Bourdon quien lo patentó en -- 1849. Un manómetro de Bourdon se presenta en la figura 2.21 a.

Este principio se puede utilizar con otras configuraciones: variaciones de la forma C como la U y la J; el tubo de bourdon torcido (fig. 2.21 e); el tipo helicoidal (fig. 21.d) y el tipo espiral (fig. 2.21 c).

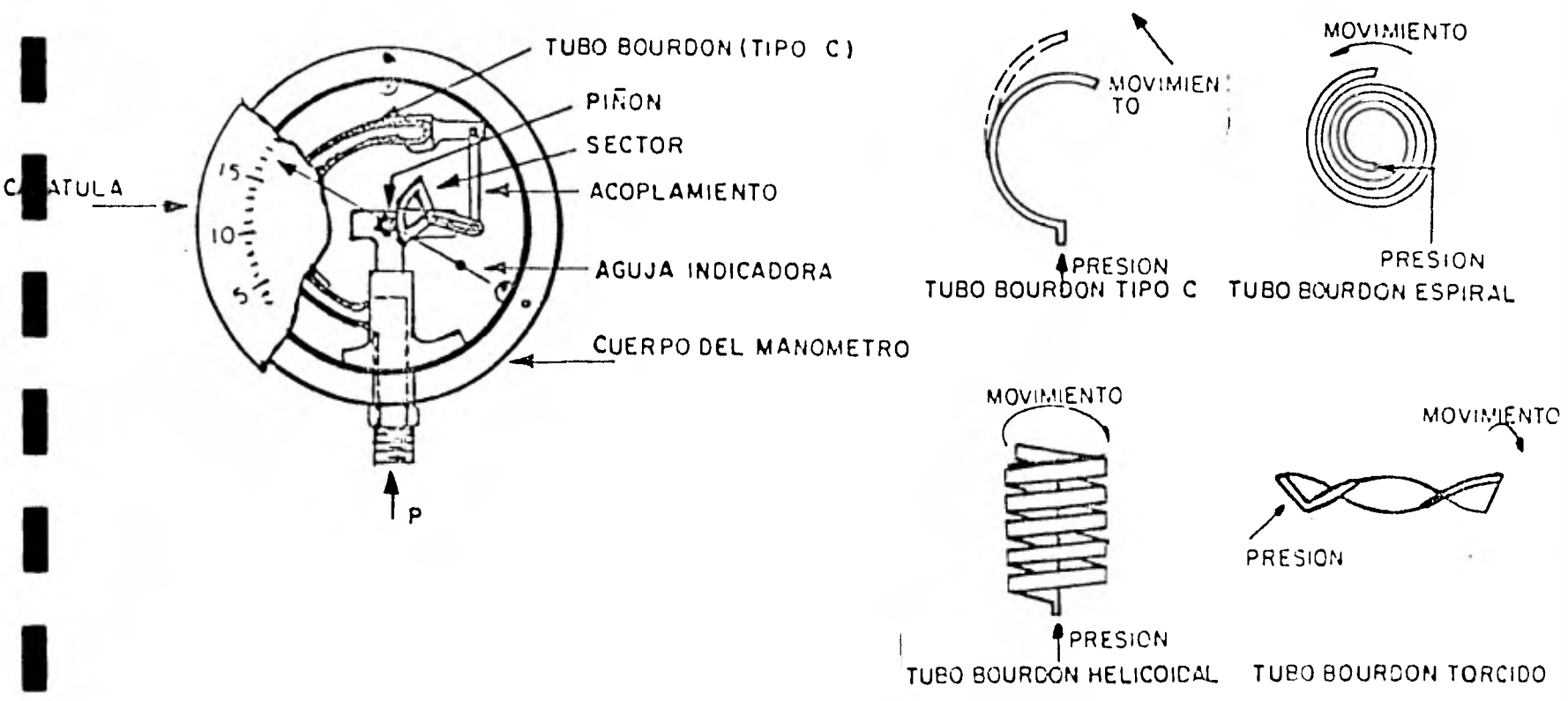


Figura 2.21 a) Manómetro de bourdon, b) Tipo "c", c) tipo espiral d) tipo helicoidal, e) torcido.

Los materiales de construcción, se seleccionan de acuerdo al rango de presión, su resistencia a la corrosión, y el efecto de la temperatura en la exactitud. Los tubos de Bourdon son sencillos, de costo bajo.

Diafragma. - Un diafragma es básicamente una lámina circular, fijada firmemente en todo su perímetro (empotrada). Hay dos configuraciones básicas utilizadas en la transducción de presión: el diafragma plano (fig. 2.22 a) y el diafragma corrugado (fig. 2.22b). Este contiene un número de corrugaciones concéntricas que le proporcionan mayor rigidez y mayor área efectiva que el diafragma plano. Consecuentemente, la deflexión utilizable también es mayor. La deflexión y su linealidad depende de la forma, localización y número de corrugaciones.

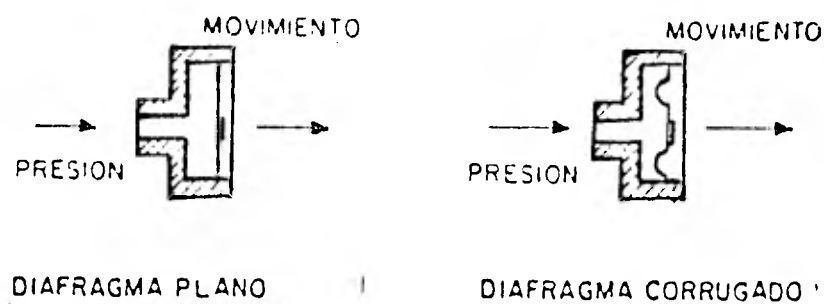


Figura 2.22 a) Diafragma plano, b) diagrama corrugado.

En la figura 2.23 a y b se presentan dos mecanismos para manómetros tipo diafragma, en los cuales este elemento se usa para soportar la presión y ejercer una fuerza en un elemento elástico en contra-posición.

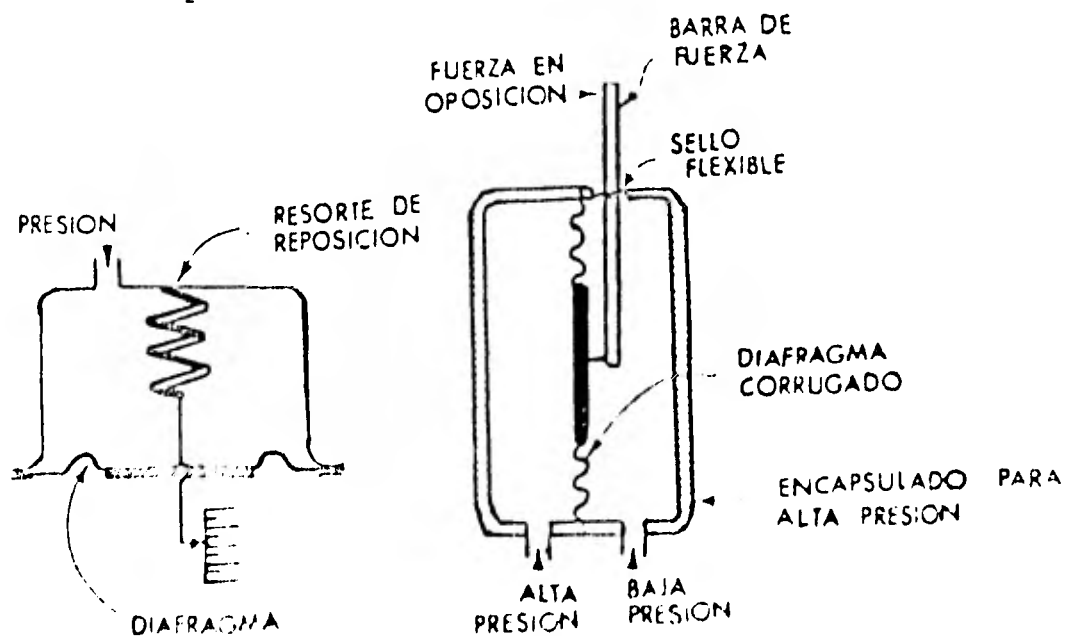


Figura 2.23 a) Elementos de presión tipo diafragma b) elemento

Cápsulas.- Las cápsulas sensoras de presión que se muestran en la figura 2.24 consisten de dos diafragmas corrugados de metal, en forma de concha, de curvatura opuesta y selladas firmemente en su periferia. Este sello puede hacerse por las diferentes formas de soldar, pero se prefiere el método de electrodo de tungsteno y gas inerte de cobertura. Pueden utilizarse, una, dos o varias cápsulas, con lo cual se obtiene una deflexión proporcional mayor; de tal manera que - si para una cápsula se utilizan dos diafragmas, ésta tendrá una deflexión cercana al doble de la obtenida con cada diafragma y la cápsula doble o triple tendrá del orden de cuatro a seis veces la deflexión de un diafragma.

Estos elementos son de costo moderado y pueden soportar grandes sobrepresiones sin dañarse, pero si se dañan, son difíciles de reparar.

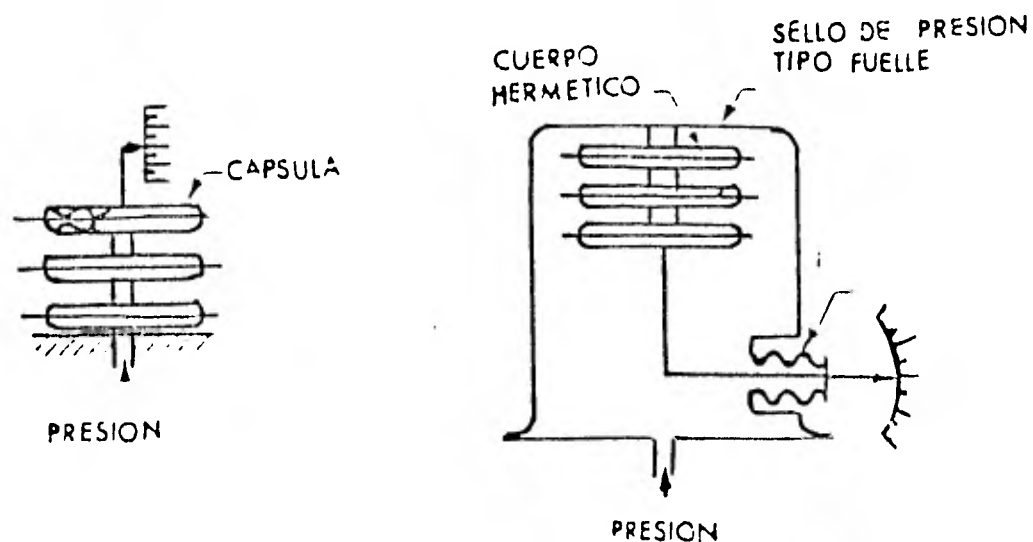


Figura 2.24 Elementos para medición de presión de cápsulas múltiples a) presión manométrica b) presión absoluta.

Celdas Extensométricas.- Cuando se tensa o se comprime un conductor eléctrico, se modifican tanto su longitud -

como su diámetro, lo cual resulta en un cambio de la resistencia eléctrica del material. Las celdas extensométricas constituyen los transductores más utilizados para medir los cambios de presión. Esto se consigue midiendo los cambios de la resistencia de la celda. La celda se encuentra físicamente unida a un elemento elástico, tal como un diafragma, el cual, se deforma elásticamente según la magnitud de la presión aplicada. Generalmente se emplean 4 celdas extensométricas para instrumentar un diafragma.

En la figura 2.25 se presentan dos tipos de celdas extensométricas así como un arreglo para medición de presión.

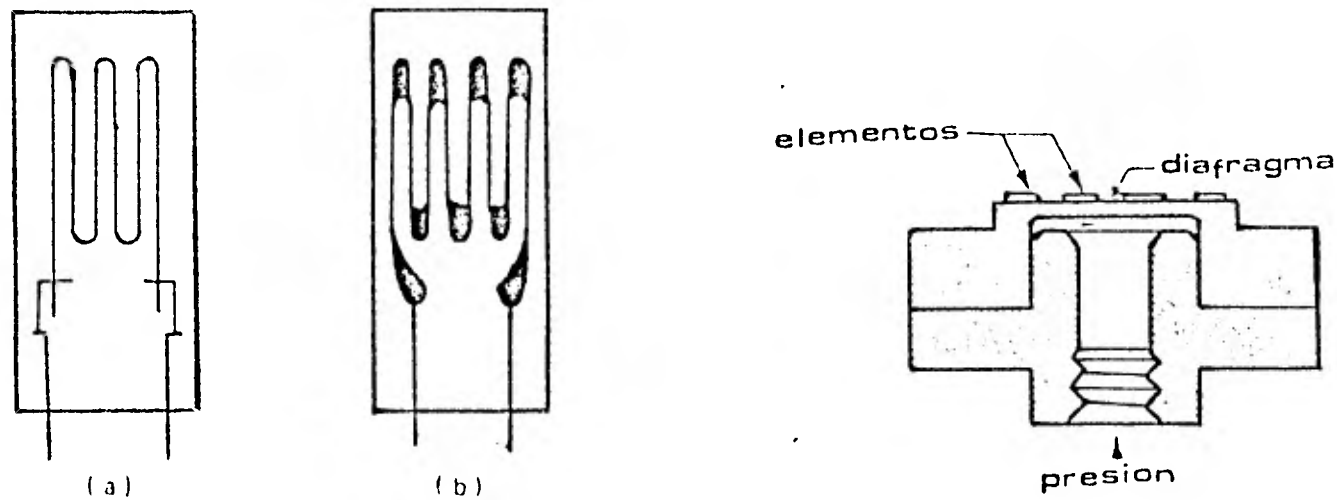


Figura 2.25 a) Celda extensométrica tipo metálico b) Tipo semiconductor c) Dispositivo para medición de presión con celdas extensométricas.

Fuelle.- Estos elementos sensores que se muestran en la figura 2.26, se hacen de tupo de pared delgada, formando en su pared convoluciones a presión. Uno de sus extremos esta sellado y se mueve axialmente cuando se aplica una presión en el extremo opuesto. Debido al gran número de convoluciones disponibles, desde menos de 10 hasta más de 20, los fuelles se usan preferentemente cuando se requieren grandes desplazamientos, cuando la presión a medir es relativamente baja y cuando no hay niveles severos de vibración.

Los fuelles se pueden usar sin fuerza de restauración o con resortes opuestos. La presión medida, se puede aplicar ya sea en el interior o en la superficie exterior del fuelle, con el lado restante expuesto a la presión atmosférica. Se puede medir presión diferencial mediante la aplicación de presión a los lados opuestos de un fuelle sencillo o la aplicación de presión a dos fuelles opuestos.

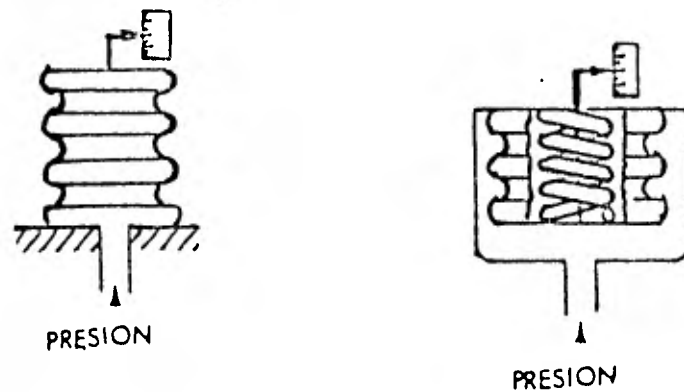
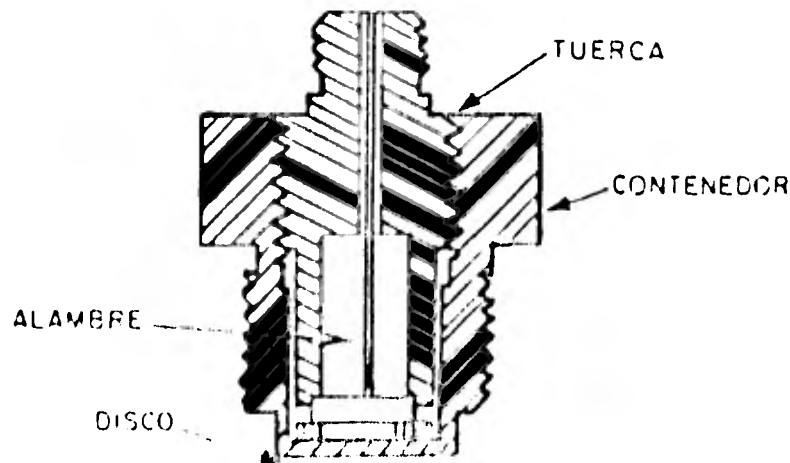


Figura 2.26 Elementos de presión tipo fuelle a) sin fuerza de reposición, b) fuelle con resorte cargado.

Transductores piezoeléctricos.— Se utilizan generalmente para presión de alta frecuencia y sonido. La mayoría de los diseños de transductores usan un diafragma plano, cuya superficie interna esta en contacto con el cristal o elemento cerámico. Algunas veces tiene un disco para transmitir la deflexión al cristal, como el mostrado en la figura 2.27.



2.27 Transductor de presión con elemento piezoeléctrico.

Transductores capacitivos.- Este principio de transducción tiene dos variantes básicas: a) cuando se aplica una presión a un diafragma y éste se mueve hacia un electrodo estacionario y b) el diafragma se mueve entre dos electrodos estacionarios mientras se aplica la presión. Este último tipo se puede observar en el corte de la figura 2.28.

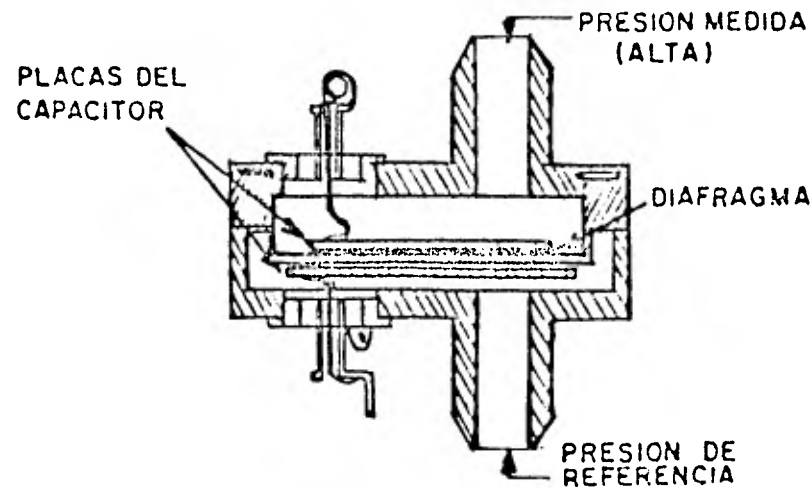


Figura 2.28 Transductor de presión tipo capacitivo.

Transductores inductivos.- En un transductor inductivo de presión, la autoinductancia de la bobina varía por los cambios en la presión inducidos por el desplazamiento de un miembro magnético en la cercanía de la bobina. La figura 2.29 muestra un diseño típico. El movimiento del diafragma - hacia el núcleo de hierro cambia la inductancia de la bobina. En otros diseños los cambios de la inductancia se originan por el desplazamiento del núcleo dentro de la bobina.

Este tipo de transductores presenta problema para compensación de efectos ambientales, especialmente temperatura, por lo que requiere de circuitos externos para tal efecto.

Medición de baja presión o vacío.- Se denomina así generalmente a la medición de presiones abajo de una atmósfera estándar. Sin embargo, las mediciones de vacío son aquellas -

que se hacen generalmente abajo de un torr.

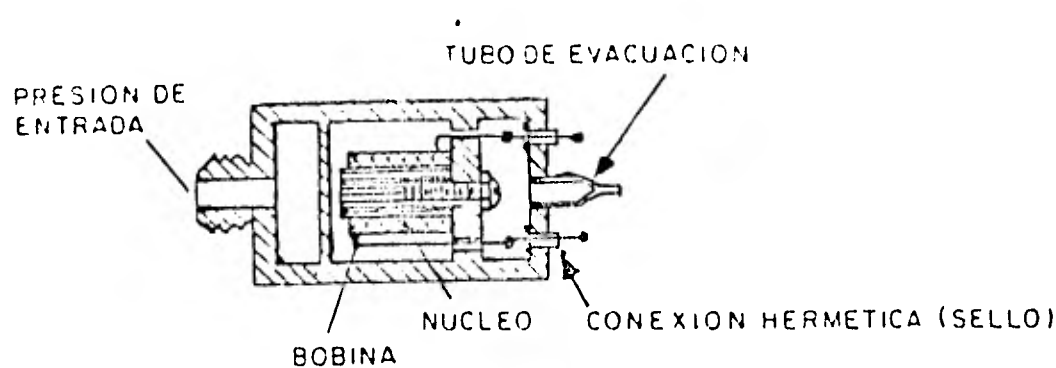


Figura 2.29 Transductor de presión tipo inductivo.

Algunos manómetros y fuelles se usan para mediciones de hasta 0.1 torr, los medidores de bourdon hasta 10 torr y los de diafragma hasta 10^{-3} torr. Abajo de estos rangos, se necesita otro tipo de medidores; como el manómetro de compresión tipo McLeod (entre 10^{-3} y 10 torr) y el indicador radiométrico de vacío de Knudsen (entre 10^{-8} y 10^{-3} torr), que también se utilizan como estándares para calibración. Además de estos dos dispositivos, se cuenta con diversos transductores de vacío.

Medición de altas presiones.- Los rangos de medición de la mayoría de los transductores analizados no exceden los 1000 Kg/cm^2 . Algunos llegan hasta los 1400 Kg/cm^2 . Otros dispositivos que utilizan transducción potenciométrica, reluctiva, piezoeléctrica o de extensómetros eléctricos alcanzan mediciones hasta los 7000 Kg/cm^2 y en algunos casos muy especiales llegan a $35,000 \text{ Kg/cm}^2$.

Uno de los dispositivos disponibles comercialmente - para mediciones de hasta $14,000 \text{ Kg/cm}^2$, con inexactitudes del 0.1 al 0.5% es el que se basa en el cambio de resistencia de un alambre de Manganina o de oro y cromo con presión hidrostática (ver figura 2.30).

El alambre sensor se devana. Uno de sus extremos se conecta al cuerpo de la celda y el otro se lleva al exterior a través de un aislante adecuado. La bobina está en el interior de un fuelle lleno de keroseno, el cual transmite la presión a la bobina. El cambio en la resistencia, el cual es lineal con la presión se mide con un puente de Wheatstone. Respecto al elemento sensor, muchas veces se prefiere utilizar -- alambre de oro-cromo porque tiene menor error por temperatura, lo cual es altamente significativo, ya que el keroseno utilizado en el interior del fuelle, experimenta un cambio de temperatura transitorio cuando ocurre el cambio de presión, debido a una compresión o expansión adiabática.

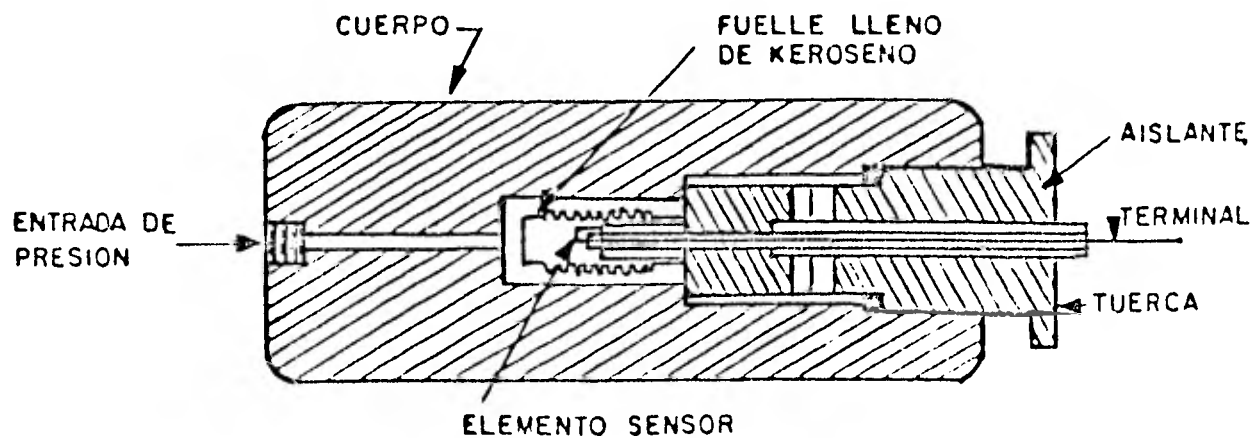


Figura 2.30 Transductor para altas presiones.

2.4 Medición de Temperatura.

La temperatura es una manifestación del promedio de energía cinética translatoria de las moléculas de una sustancia, que se debe a la presencia de calor. Comparativamente la temperatura está relacionada a la energía calorífica como la -

32

tensión lo está a la energía eléctrica. Esta variable comunmente tiene efecto directo en las características del producto, ya que en función de la temperatura, una reacción química puede desarrollarse con mayor o menor rapidez.

Los sensores de temperatura pueden clasificarse en términos generales como Mecánicos, Eléctricos y de Radiación Térmica, a continuación se presenta un resumen de las mediciones de temperatura. (hoja anexa)

Medición con termopares.- Los termopares fueron descubiertos en 1821 por el científico alemán Seebeck.

En la figura 2.31 a) se presentan dos metales A y B unidos por sus extremos, los cuales se someten a las temperaturas T_1 y T_2 en uno y otro extremos. Se observa que bajo las condiciones anteriores fluye una corriente desde el extremo más caliente hacia el más frío. Si el circuito se abre como se muestra en la figura 2.31 b) se genera una fuerza electromotriz, la cual es proporcional a la diferencia de temperatura de T_2 y T_1 .

En la práctica la unión T_2 (punta caliente) se encuentra en contacto con el fluido del cual se quiere medir la temperatura y la unión T_1 (punta fría) se encuentra a la temperatura respecto a la cual queremos medir la del proceso. La referencia puede considerarse la temperatura de cero grados o la temperatura ambiente. Además puede adaptarse una compensación térmica o eléctrica a fin de mantener la referencia constante independientemente de los cambios en la temperatura del ambiente según se aprecia en la figura 2.32.

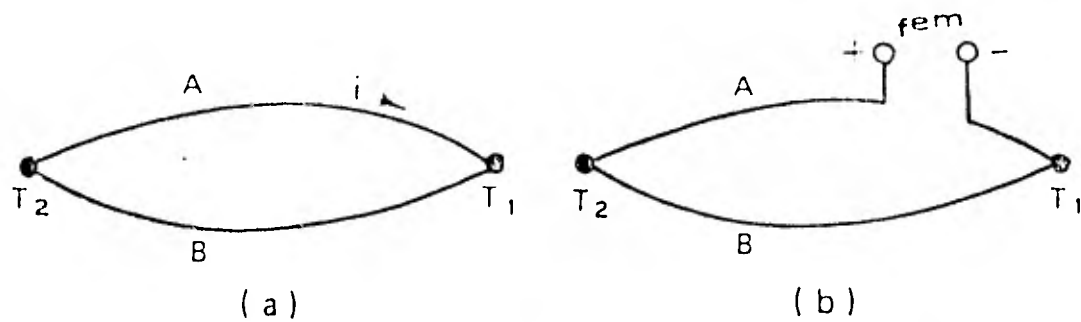


Figura 2.31 Circuitos con termopar a) Anillo con corriente
b) Fuente de tensión controlada por temperatura.

Se puede utilizar la conexión en serie de varios termopares idénticos con objeto de aumentar el nivel de señal de salida o en otro caso, si cada termopar físicamente se encuentra en un punto diferente, podemos determinar la temperatura promedio de esos puntos, una conexión como la descrita anteriormente se presenta en la figura 2.33.

Hay que notar que las uniones de referencia deben estar a la misma temperatura y que entonces la temperatura promedio es:

$$T_{\text{prom.}} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_m}{M}$$

Cuando entre el punto de proceso y el lugar en donde se mide o registra la temperatura, existe una distancia considerable, es necesario utilizar alambre de extensión, el cual tiene las mismas características termoeléctricas a la temperatura ambiente que las del termopar en cuestión, de manera que no se formen termopares parásitos.

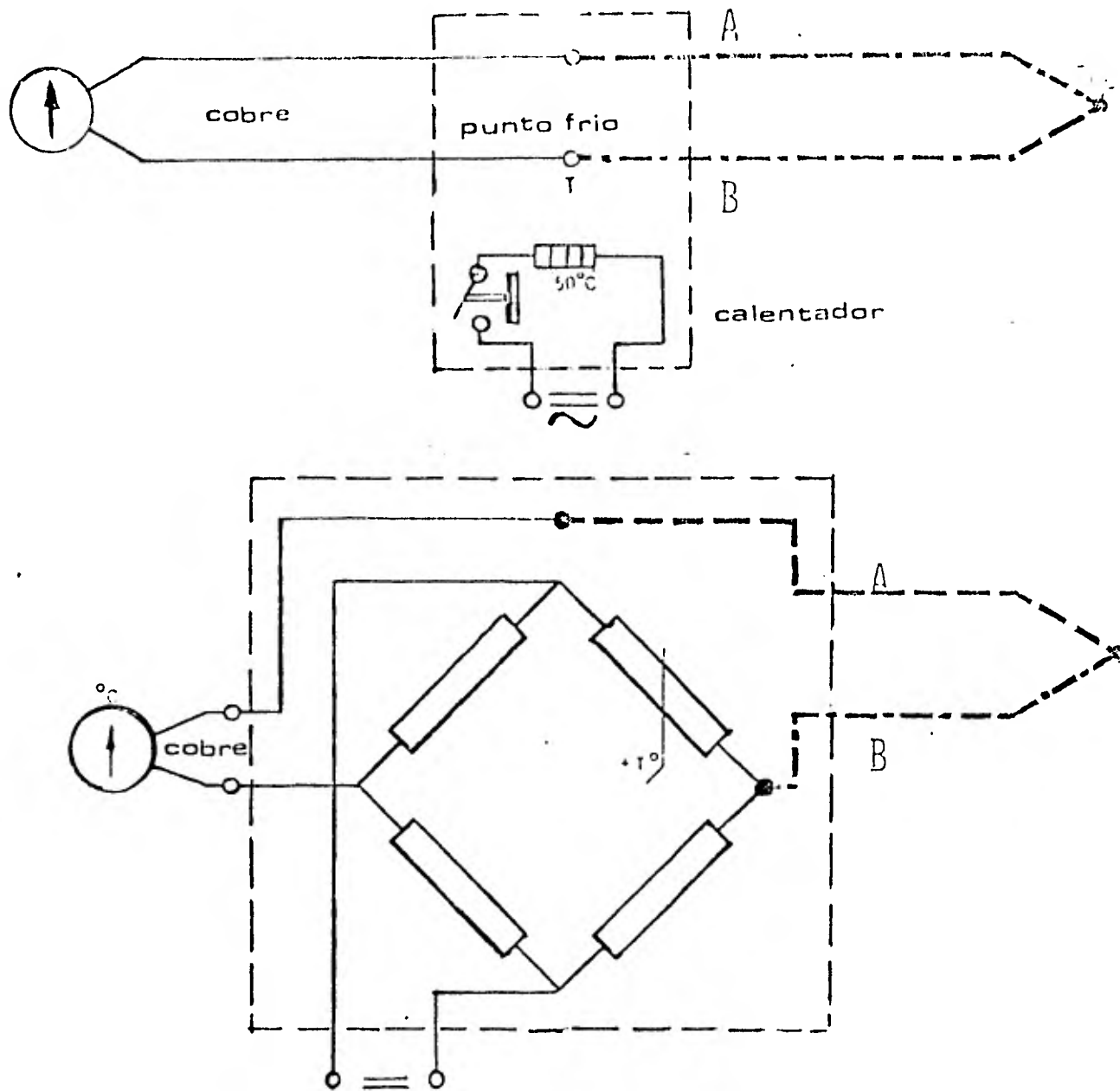


Figura 2.32 Circuitos para la compensación de temperatura
 a) Mediante el calor generado en una resistencia
 b) Mediante una tensión eléctrica equivalente.

El cableado de los termopares debe hacerse en ductos distintos a los de los cables de potencia, para evitar señales de ruido inducido, además el ducto de los termopares debe estar tan lejos como sea posible del ducto que contiene los cables de potencia.

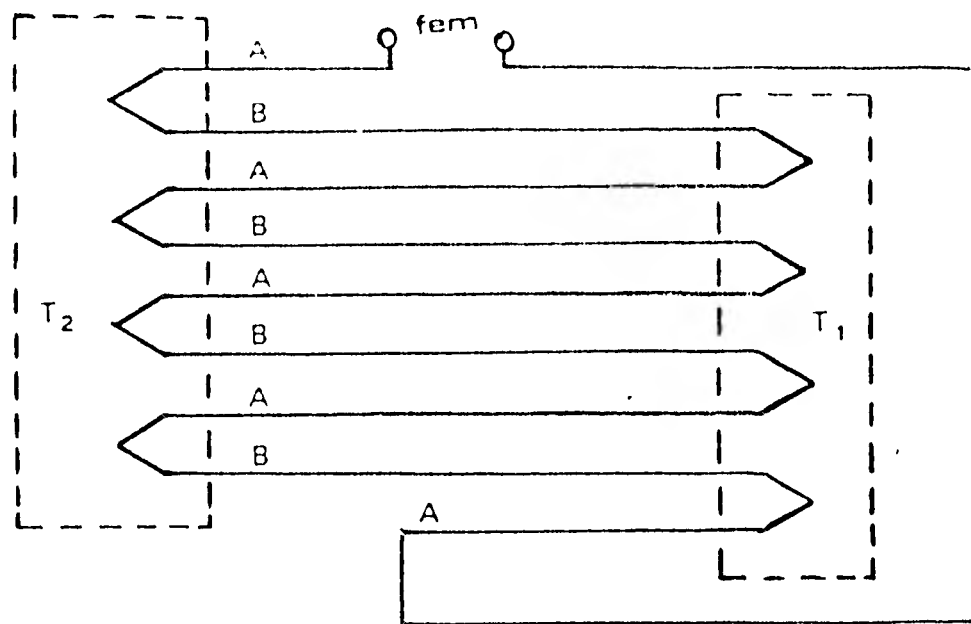


Figura 2.33 Conexión en serie de varios termopares para la medición de la temperatura promedio.

En la figura 2.34 se presenta el aspecto físico de un termopozo que es la manera comercial en que se consigue el termopar. A continuación se mencionan dos tipos de cable de extensión de acuerdo al tipo de termopar

<u>TERMOPAR</u>	<u>CABLE DE EXTENSION</u>
+ Cromel - alumel	+ Cobre - constantan
- Plata rodio - platino	- Cobre - cobre-nichel

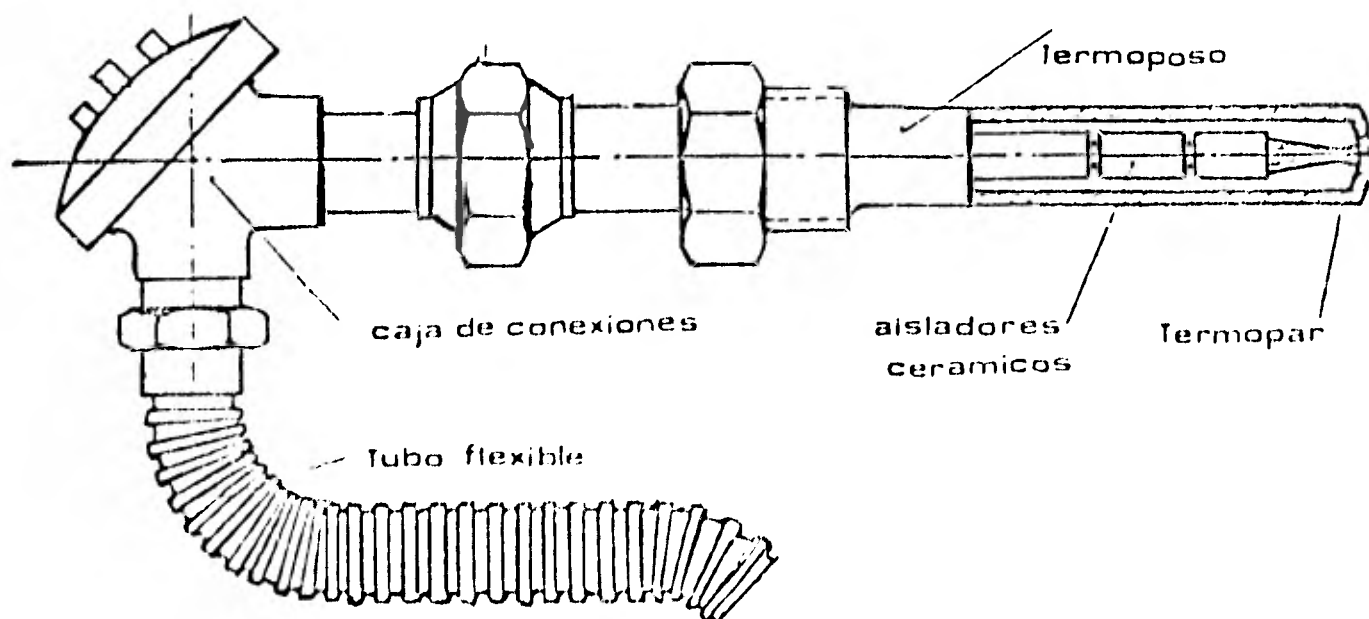


Figura 2.34 Aspecto físico de un termopozo.

Termómetro de Resistencia.- Los materiales más comunes en la construcción de estos termómetros, son el Níquel, el Cobre y el Platino, en la figura 2.35 se presenta la característica resistencia-temperatura de estos metales. Se sabe que cuando se modifica la temperatura a la cual se encuentra sometido un metal, este cambia su resistencia de acuerdo a la relación $R=R_0 (1 + \alpha \Delta T)$.

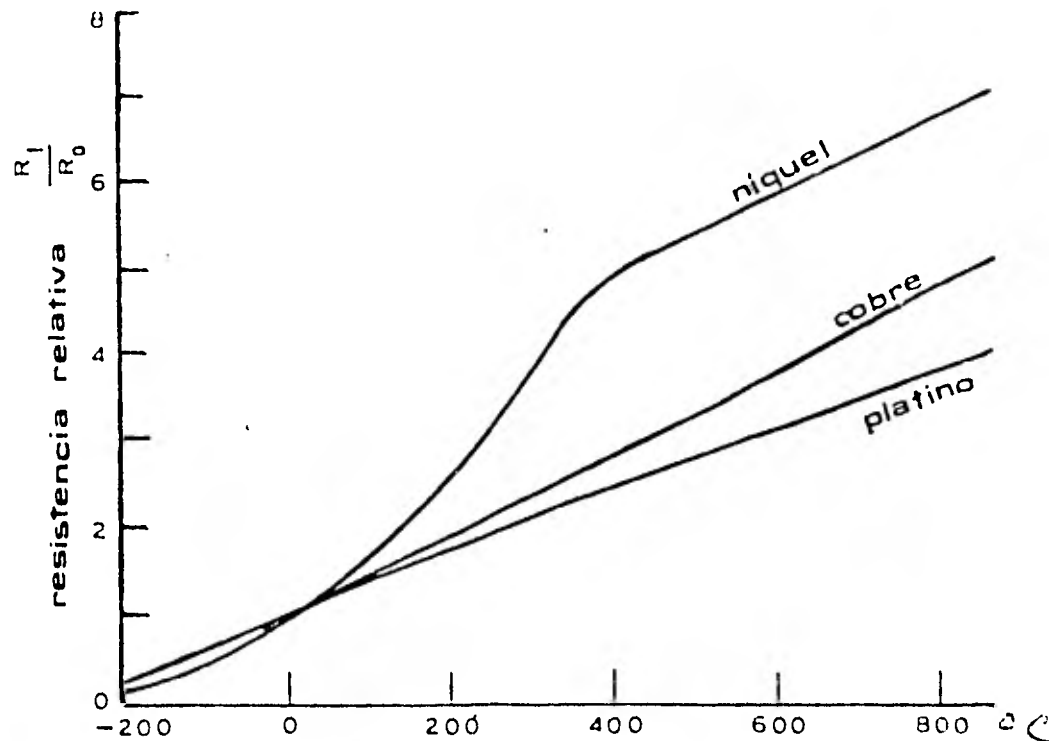


Figura 2.35 Curvas de resistencia-temperatura a) níquel, b) cobre y c) platino.

El elemento térmico está en contacto con el medio del cual se desea medir la temperatura, además constituye uno de los brazos de un puente de Medición de Resistencia, tal como el de Wheatstone, cuyo elemento de medición está graduado en unidades de temperatura. En la figura 2.36 se presenta un circuito de este tipo.

Mediante la utilización de amplificadores operacionales, se está generalizando la utilización de estos elementos, para la medición de temperatura en las partes críticas de los equipos de gran tamaño, tal como los motores de más de 100 H.P., utilizadas en las minas.

asi que sustituyendo la expresi3n anterior para $(v_1 - v_2)$ queda

$$V_0 = \left(\frac{-R_2}{R_2 + R_3} + \frac{R_1}{R_1 + R_x} \right) \frac{R_A}{R_B} E_{exc}$$

Cuando $T = T_{ref.}$ se debe cumplir que:

$$R_x = R_0 (1 + \alpha \Delta T) = R_0 \quad \text{ademi3s}$$

$$R_3 = R_0 \quad R_1 = R_2$$

por lo cual

$$V_0 = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_x} \right) \frac{R_A}{R_B} E_{exc} = 0$$

lo cual significa que la lectura del instrumento vale cero. El otro extremo de la escala se consigue cuando $R_x(T) = R_{max}$ y la aguja alcanza su m3xima deflexi3n. Por simplicidad no se muestran la compensaci3n por desajuste de cero, ni la compensaci3n para la longitud del cable de conexi3n entre el elemento de resistencia y el amplificador, que normalmente tienen los dispositivos comerciales. En la figura 2.37 se presenta la constituci3n f3sica de los term3metros de resistencia que se compone de un n3cleo cer3mico en el cual se enrolla el material conductor, despu3s se le empaca mediante elementos conductores t3rmicos.

Medici3n con Termistor.- Los termistores se introdujeron al mercado desde 1940, son compuestos de 3xidos met3licos tratados t3rmicamente para lograr las caracter3sticas f3sicas y el3ctricas necesarias. El material asi tratado se vuelve semiconductor, el cual, en funci3n de la temperatura aumenta el n3mero de portadores de carga el3ctrica, y por tanto disminuye su resistencia. La relaci3n funcional entre temperatura y resistencia es:

$$R = R_0 e^{(\beta/T - \beta/T_0)} \quad [9]$$

A continuación se presenta la relación funcional entre los cambios de temperatura y la tensión de salida v_o del circuito de la figura 2.36.

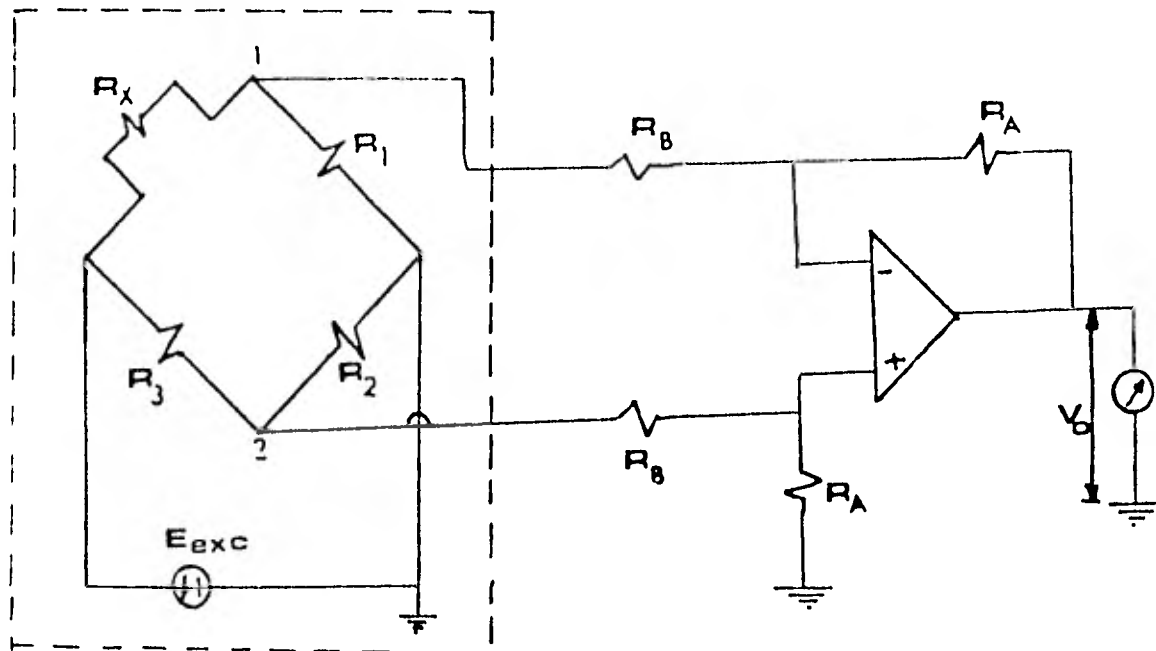


Figura 2.36 Puente para medir resistencia calibrado en unidades de temperatura.

Análisis del puente de Wheatstone.

$$v_2 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} E_{exc} \quad v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_X} E_{exc}$$

$$v_1 - v_2 = \left[\frac{-R_2}{R_2 + R_3} + \frac{R_1}{R_1 + R_X} \right] E_{exc}$$

Análisis para la etapa de amplificación. La configuración utilizada recibe el nombre de amplificador diferencial, se puede demostrar que:

$$\frac{v_o}{v_1 - v_2} = \frac{R_A}{R_B} \quad \text{ó} \quad v_o = \frac{R_A}{R_B} (v_1 - v_2)$$

donde:

$R_0 \hat{=}$ Resistencia del termistor a la temperatura de referencia en ohm.

$T_0 \hat{=}$ Temperatura de referencia en °K.

$T \hat{=}$ Temperatura nueva en °K.

$\beta \hat{=}$ Coeficiente variación de resistencia por temperatura del termistor en particular, en °k.

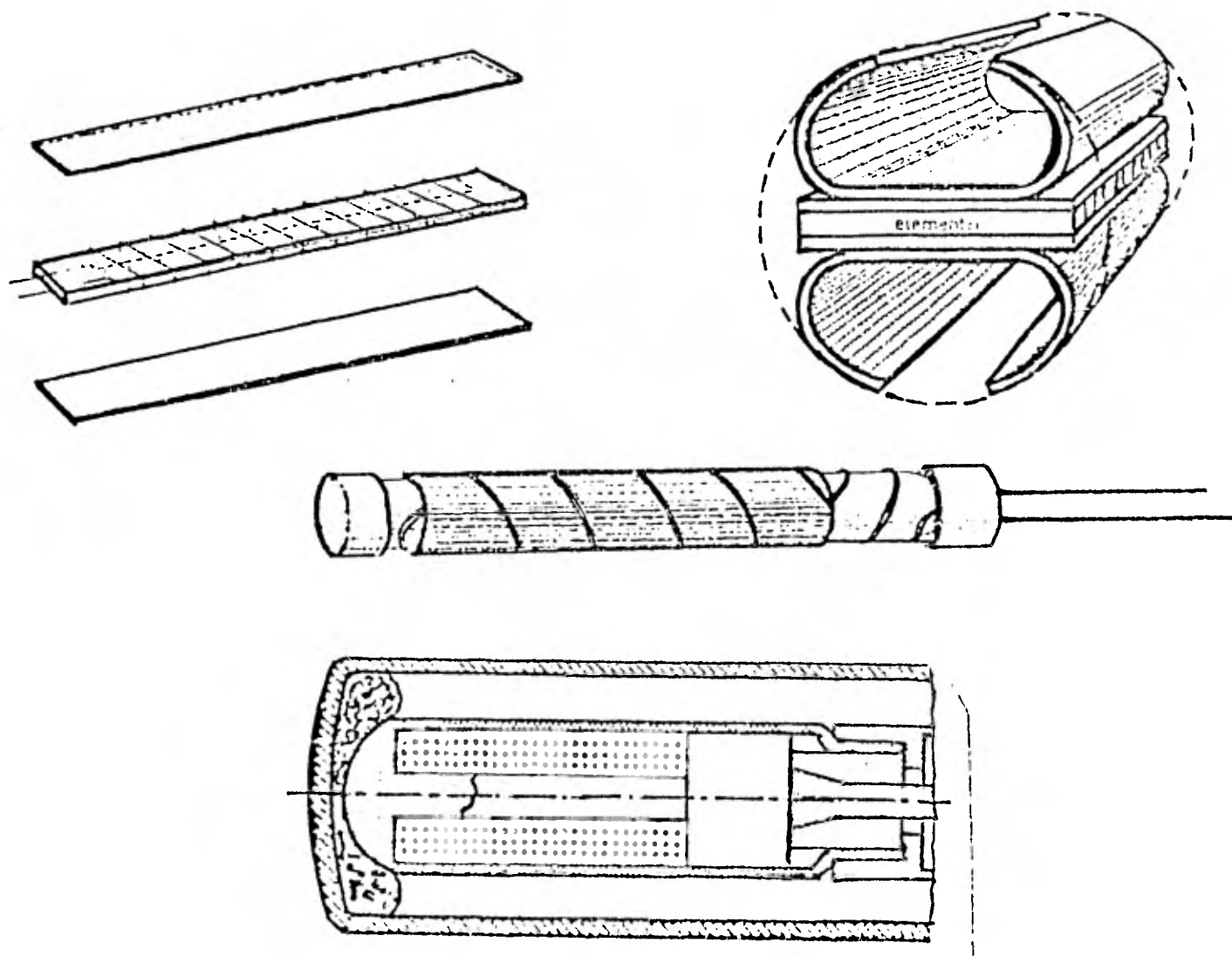


Figura 2.37 Construcción de un termómetro de resistencia.

En la figura 2.38 se muestra la curva resistencia-temperatura de un termistor común, así como las presentaciones comunes de los termistores. De la relación funcional, se debe

ce que el termistor tiene una alta sensibilidad, $\left(\frac{\partial R}{\partial T} = -\frac{\beta}{T^2} A e^{\beta/T} \right)$

lo cual les dá una alta velocidad de respuesta, pero son menos estables que los termopares o los termómetros de resistencia. La temperatura se mide mediante puentes de resistencia calibrados en unidades de temperatura como los empleados con los elementos metálicos, pero además, si se necesita una escala lineal, es necesario utilizar un circuito de linealización tal como el que se muestra en la figura 2.39.

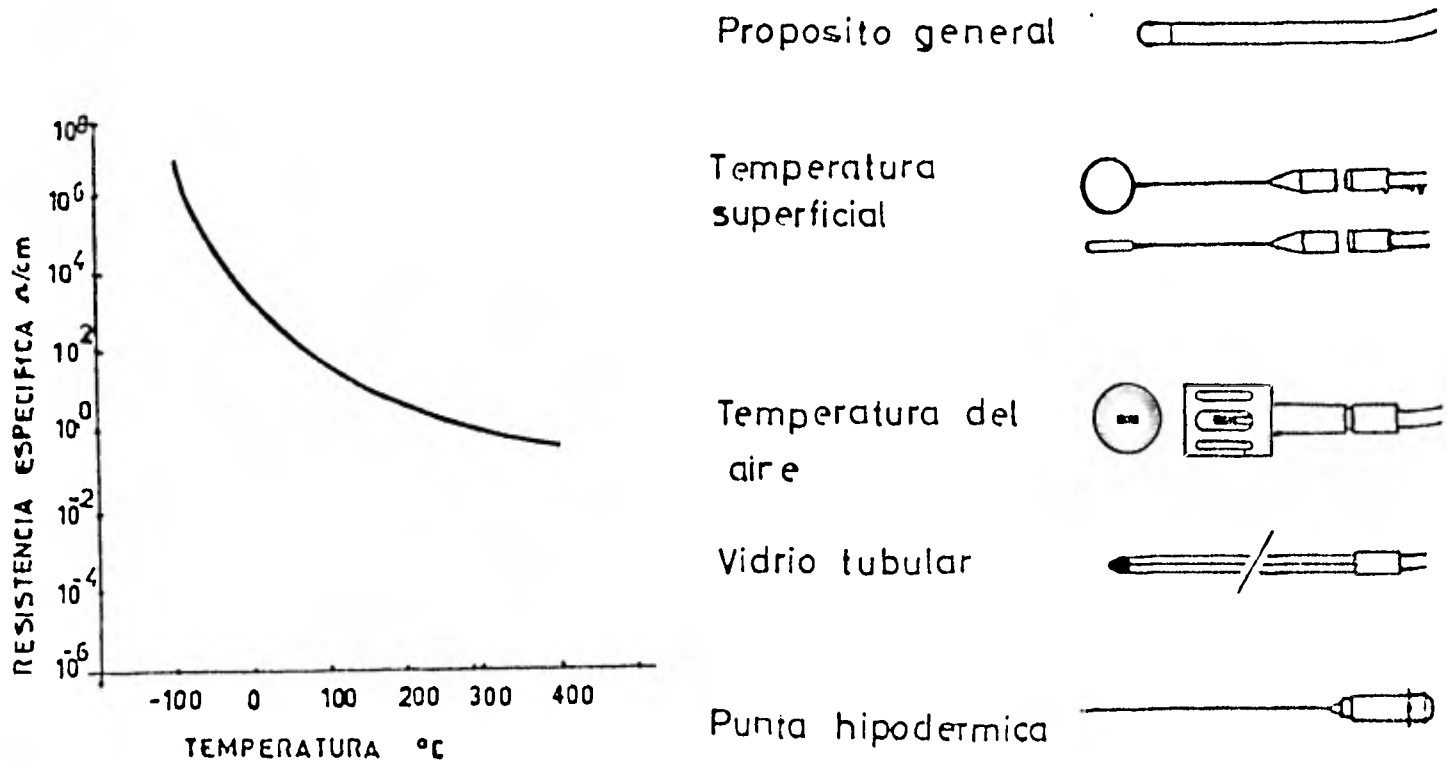


Figura 2.38 a) Curva resistencia temperatura de un termistor
b) Formas comerciales del termistor.

Sistema termal lleno.- Consiste de un bulbo y un tubo capilar llenos de un gas o líquido que se dilata y aumenta su presión o su volumen en función de la temperatura. En el otro extremo se encuentra un elemento elástico como los degcritos para las mediciones de presión, el cual traduce el cambio de temperatura, en un desplazamiento mecánico. En la figu

ra 2.40 se muestra un sistema termal lleno.

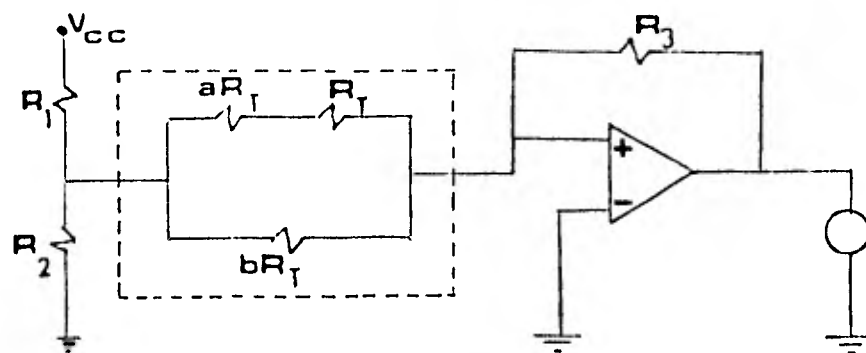
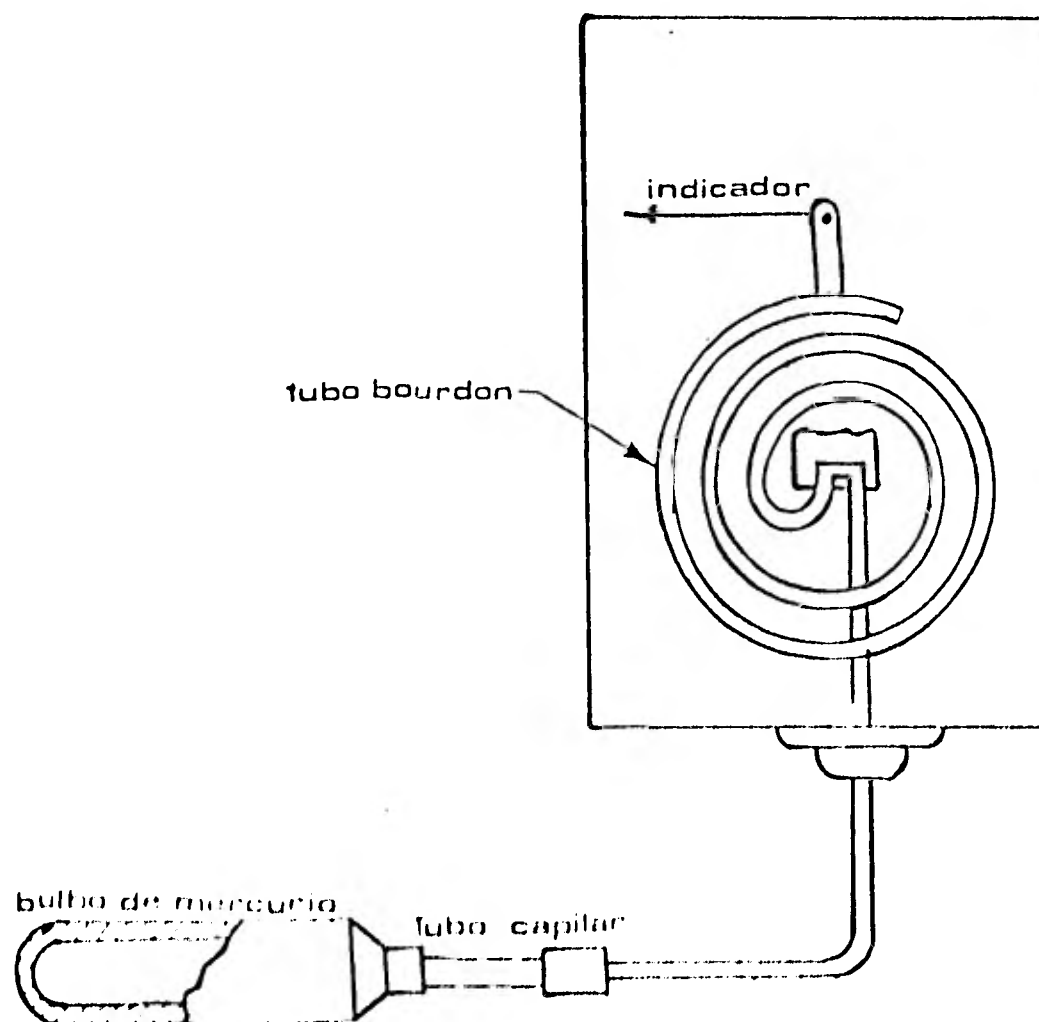


Figura 2.39 Circuito electrónico para medición de temperatura usando un termistor.



Termómetros Bimetálicos.- Los termómetros como su nombre lo indica, se construyen de dos metales A y B unidos - mecánicamente y de coeficientes de dilatación distintas. Cuando dicho par de metales se somete a una temperatura distinta - de la del ambiente, se presenta una deformación mayor en un metal que en otro., por lo que, la unión, tiende a encerrarse.

Los materiales empleados normalmente son:

INVAR (aleación fierro - níquel) con un bajo coeficiente de expansión lineal.

BRONCE con alto coeficiente de expansión.

En la figura 2.41 se presentan las formas más comunes de los elementos bimetálicos primarios.

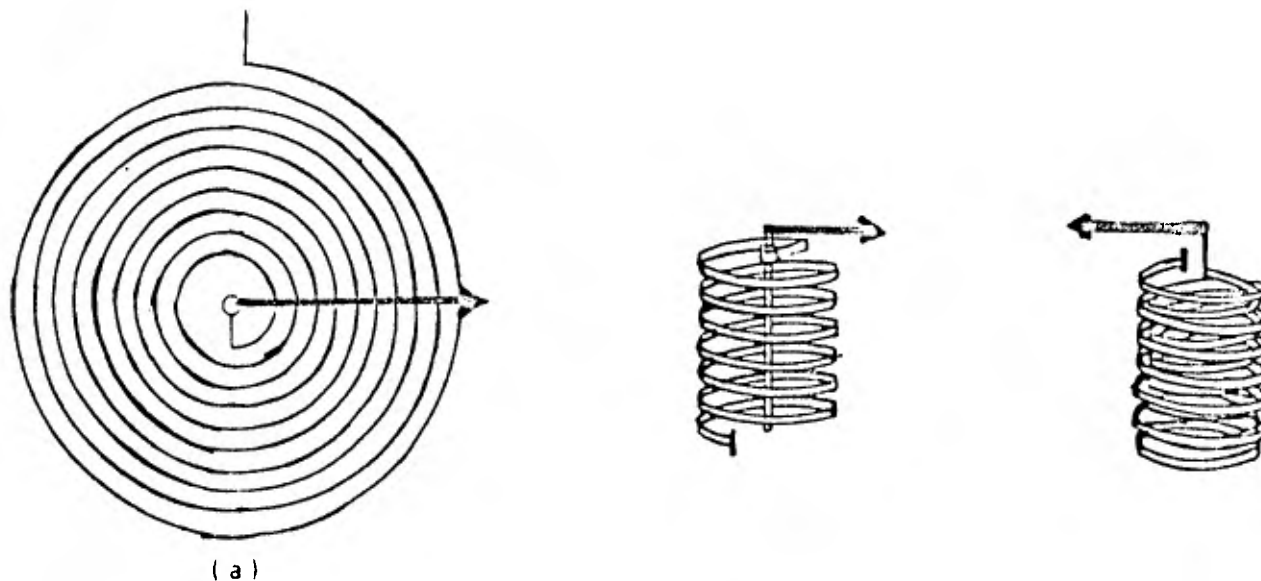


Figura 2.41 Elementos bimetálicos a) espiral plano b) helicoidal-sencillo c) helicoidal múltiple.

Medición de Temperatura por Radiación.- La medición se realiza sin hacer contacto directo con el medio del cual se mide la temperatura, en cambio se aprovecha la energía que radian los objetos en función de su temperatura. La radiación - térmica está expresada por la relación de Stefan - Boltzmann.

$$E_b = a T^4 \quad \text{donde:}$$

$$E_b = \text{Potencia emisiva en BTU}/(\text{hr})(\text{ft}^2).$$

$$a \hat{=} \text{Constante Stefan-Boltzman} \\ 0.1714 \times 10^8 \text{ BTU}/(\text{hr})(\text{ft}^2) (\text{°R}^4).$$

$$T \hat{=} \text{Temperatura absoluta } (\text{°R})$$

En la figura 2.42 se presenta un pirómetro de radiación el cual concentra la emisión radiante, mediante un lente, para calentar un termopar y proporcionar una indicación de la temperatura. Obsérvese que debido a la relación funcional, la salida es no-lineal. Esta es la única forma de medir muy altas temperaturas; además no se necesita hacer contacto.

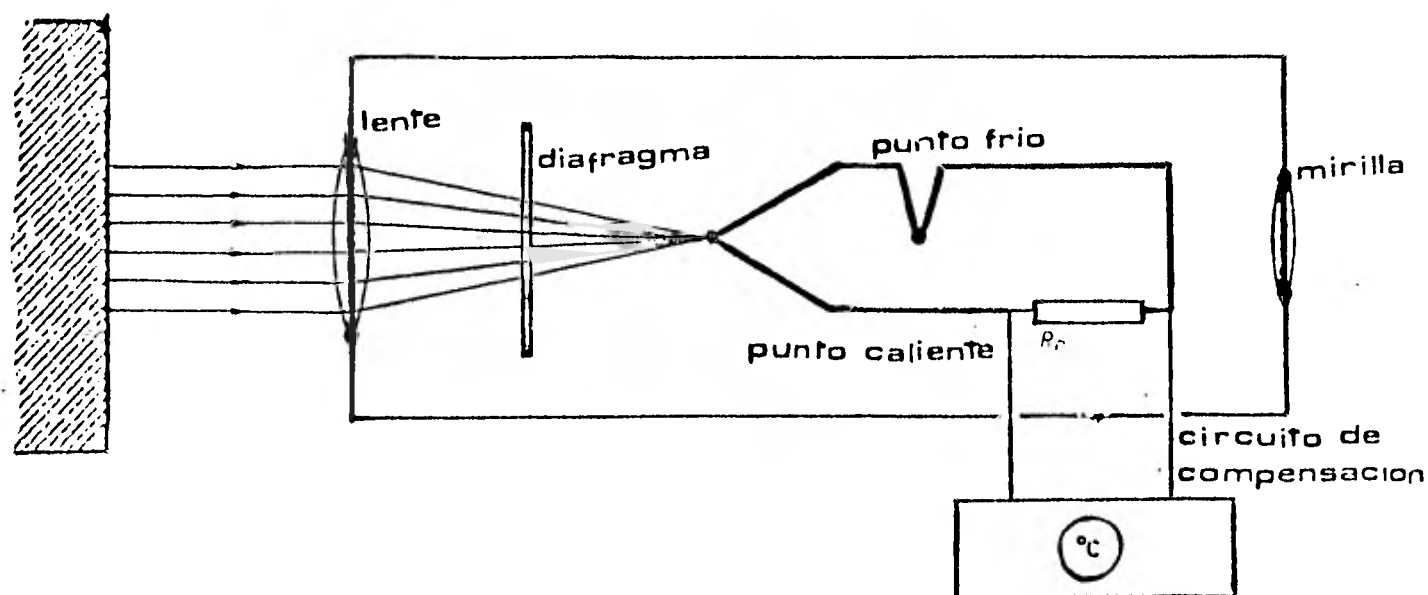


Figura 2.42 Pirómetro de radiación con termopar.

El pirómetro de Brillantez, compara la radiación de una referencia con la del medio a medir. El dispositivo consiste de un filamento el cual tiene una brillantez variable - en función del ajuste de un potenciómetro en serie. El operador ajusta la brillantez del filamento hasta igualar la del objeto del cual se quiere medir la temperatura. En este momento el filamento no es visible, ya que su brillantez, es igual a la del objeto.

La corriente que se requiere para lograrlo, esta calibrada con la temperatura del objeto. Este pirómetro es de buena precisión y requiere de batería, es relativamente caro. Su principio de operación se presentan en la figura 2.43.

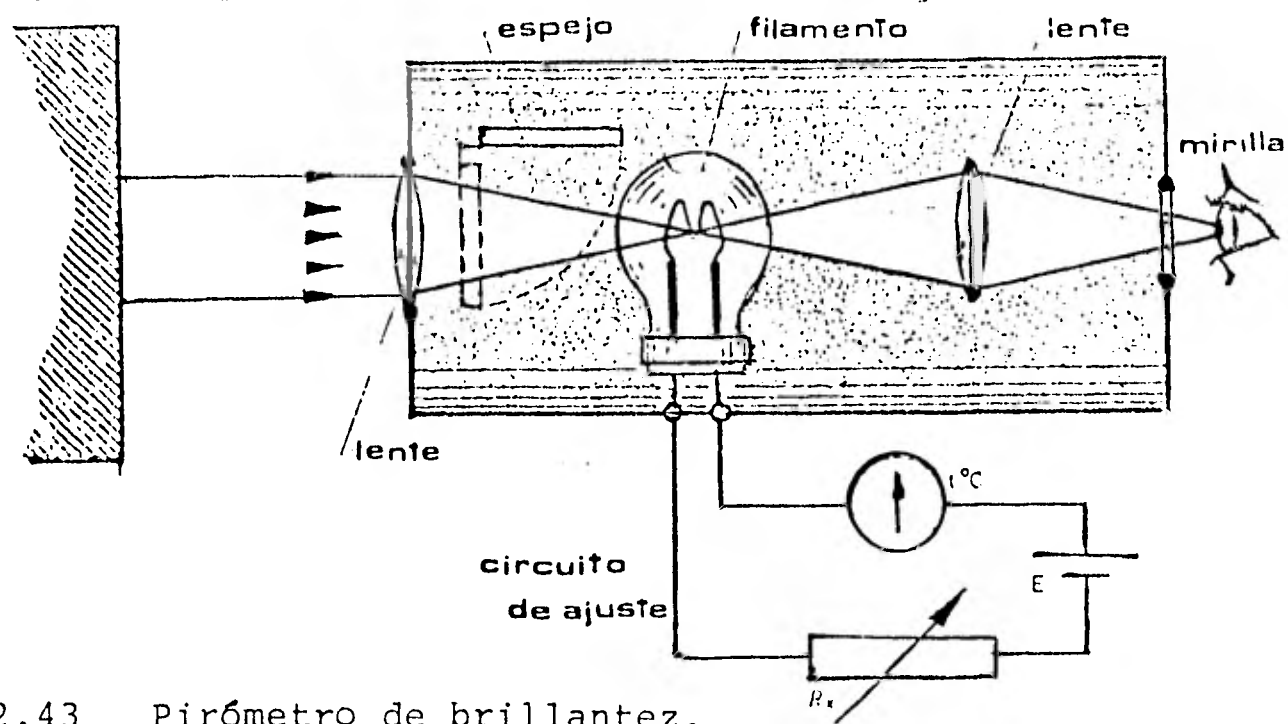


Figura 2.43 Pirómetro de brillantez.

TERMOMETROS LIQUIDOS (-200 a 750)

----- Alcohol

----- mercurio en funda de vidrio

----- mercurio en funda de cuarzo

TERMOMETROS DE BULBO (-200 a 690)

----- presión de gas y vapor

----- mercurio bajo presión

TERMOMETROS DE EXPANCIÓN METALICA (-30 a 1000)

-200 0 200 600 1000 1400 1800 °C

TERMOPARES (-200 a 1600)

----- Hierro-Constantan

----- Cromel-Alumel

----- Platino Rodio

TERMOMETROS DE RESISTENCIA (-200 a 750)

----- Platino

----- Nickel

----- Termistor

PIROMETROS (-40 a ...)

PINTURAS SENSIBLES A LA TEMPERATURA (40-1600)

CONOS DE FUSION - (100 a 2000)

-200 0 200 600 1000 1400 1800 °C

C A P I T U L O I I I

MODELOS MATEMATICOS DE LOS PROCESOS

Introducción

El control de procesos es una parte de la teoría del control automático, la cual utiliza las matemáticas como una herramienta para el planteamiento del problema, así como para la solución, misma que debe ser físicamente realizable y cumplir lo mejor posible con el desempeño deseado del sistema.

Existen muchas formas para controlar los procesos, una primera clasificación serían los métodos de control lineales y no-lineales. Aún cuando la mayoría de los controladores son lineales, debe tomarse en cuenta que este comportamiento se conserva solo en un rango limitado, ya que por ejemplo los controladores neumáticos tienen un comportamiento no-lineal -- tanto para presiones bajas como para presiones cercanas al valor de saturación.

Es muy común establecer un compromiso entre las características dinámicas del proceso a ser controlado y la obtención del desempeño deseado mediante controladores comercialmente disponibles, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a la forma de procesar el error en:

- 1.- Controladores On Off o de dos posiciones.
- 2.- Controlador proporcional.
- 3.- Controlador proporcional + integral
- 4.- Controlador proporcional + integral + derivativo.

Así mismo los ajustes de estos controladores pueden efectuarse según se tengan cambios frecuentes en el valor fijado (S.V.) o en la carga o salida del proceso (M.V.).

3.2 Criterios para el Desempeño del Sistema de Control.

Algunos criterios que se han establecido para juzgar el desempeño de los sistemas de control son:

1.- Integral de error.- Puesto que el error E , $(SV-MV)$ puede ser positivo o negativo, puede suceder que la integral del error valga cero si el sistema oscila continuamente, por lo cual este criterio no proporciona una medida de la estabilidad.

2.- Magnitud del error.- Este criterio tiene la posibilidad de una desviación (un error por desajuste pequeño y permanente) lo cual es inconveniente para la malla de control .

3.- Integral del valor absoluto del error (IAE).- Es una medida del área total bajo la curva de respuesta, tanto arriba y abajo del valor de error cero. Es uno de los criterios de desempeño más utilizados. Debido a que el error en ciertos casos desaparece después de algún tiempo de transcurrido el cambio en la carga, el valor de IAE alcanza un valor específico para una malla estable.

4.- Integral del error cuadrático medio (ISE).- El valor instantáneo del error es elevado al cuadrado y enseguida se le integra en el tiempo. El elevar al cuadrado evita que los errores con signo negativo se cancelen con los de signo positivo y así mismo pondera más a los valores grandes del error que los valores pequeños.

5.- Valor cuadrático medio del error (RMS).- Este índice, es la desviación estandar del error; si el error es reducido a cero, después de cierto tiempo el valor RMS también vale cero, por lo cual este criterio se aplica a sistemas que presentan valor de estado estable diferente a cero.

Los criterios comúnmente empleados son (IAE) e (ISE) y la principal diferencia entre ambos es que el segundo pondera los

errores grandes. Dos curvas de respuesta con el mismo (IAE) tendrá diferente (ISE) si existe diferencia en la magnitud del error.

Debido a lo anterior, el (ISE) es aparentemente una combinación de la magnitud del error y del (IAE). Solo en el caso que la curva de respuesta cae arriba o abajo del valor -cero de error, la integral del error vale (IAE).

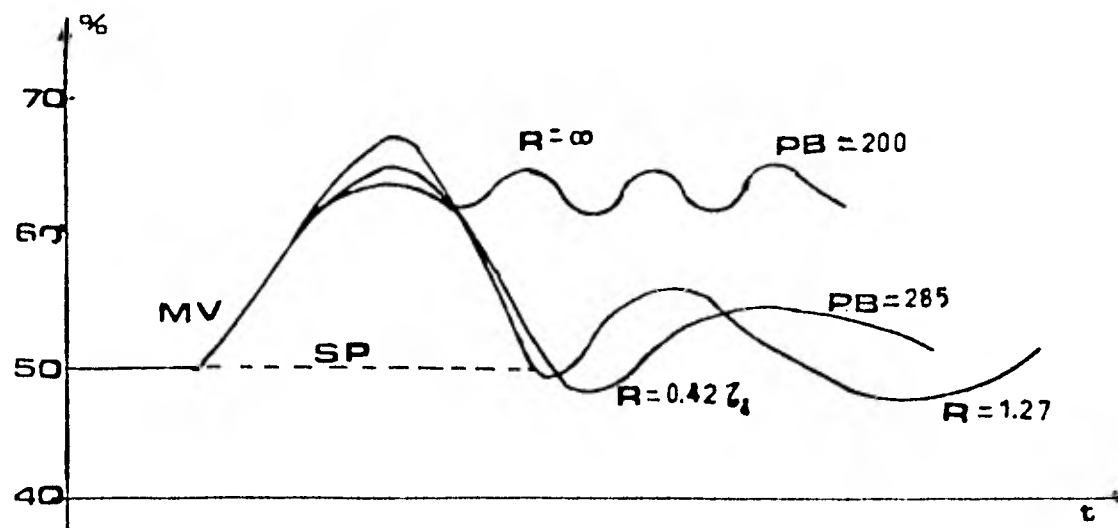
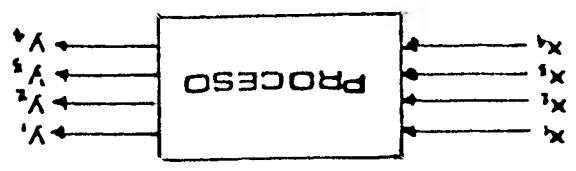


Figura 3.1 Diferentes curvas de respuesta a entrada escalón, para diferentes ajustes del controlador. Todas las curvas tienen el mismo amortiguamiento, pero diferentes velocidades de recuperación.

El procedimiento para seleccionar los modos de operación del controlador y los ajustes de sus parámetros es consecuencia de la experiencia y habilidad del ingeniero de proceso, sin embargo, mediante un modelo del proceso y la determinación de los parámetros del mismo en forma experimental, es posible efectuar la síntesis algebraica del controlador, así como los ajustes de sus parámetros, sin que exista gran diferencia con las prácticas industriales en uso. Los resultados así obtenidos

3.2 Bloque representativo de un proceso de múltiples entradas, múltiples salidas.



Para cualquier proceso se puede establecer una relación funcional entre una de las entradas y una de las salidas. Incluyendo la posibilidad de que dicha relación valga cero.

- 1.- Conservación de la masa.
- 2.- Conservación de la energía.
- 3.- Conservación del momentum.
- 4.- Ecuaciones de transporte para masa, momentum y energía.
- 5.- Relaciones de equilibrio.

Las relaciones fundamentales en el establecimiento del modelo son:

El modelo matemático de los procesos industriales requiere del conocimiento de las leyes fundamentales de la Química y la Física. Adicionalmente los modelos matemáticos incluyen correlaciones para describir los procesos de transferencia de calor, masa y fluido en los sistemas físicos y Químicos.

3.3 Selección del Modelo.

no son los que logran el mejor desempeño, pero constituyen muy buenas aproximaciones a fin de iniciar el procedimiento de prueba y error que finalmente proporciona los mejores ajustes.

Existen esencialmente 2 maneras para encontrar el modelo del proceso:

- a) Mediante las leyes físicas y químicas básicas y los datos del equipo.
- b) Estimarlos del análisis de los datos experimentales.

Debe preferirse combinar ambos procedimientos debido a que el primero nos permite predecir como se comportará el proceso, y el segundo nos permite estimar los parámetros desconocidos o difíciles de medir.

La selección.- consiste en determinar la estructura o el tipo de modelo del proceso, por ejemplo:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau S + 1} \quad \text{ó} \quad \tau \frac{dy}{dt} + y = Kx \text{ etc.}$$

De acuerdo a su estructura el modelo se puede clasificar en:

Estático	ó	Dinámico
Lineal		No-lineal
Invariante en el tiempo		Variante con el tiempo
Determinístico		Estocástico
Concentrado		Distribuido

Algunas veces la selección se puede verificar usando datos experimentales para definir cual es mejor que otro. Otras ocasiones la decisión se deriva del método de identificación o de control que se haya empleado.

Los métodos de entrada escalón y de respuesta a la frecuencia, normalmente proporcionan un buen desempeño del sistema de control. Cuando un proceso se ve afectado de perturbaciones considerables y límite en la cantidad de pruebas disponibles, se prefiere utilizar técnicas estadísticas.

La estimación del valor.- Es determinar el valor real de la variable del proceso (temperatura, nivel, etc.,) a partir de una medición inexacta.

La Estimación de Parámetros.- Es la determinación de los parámetros estáticos o dinámicos (velocidad de reacción, ganancias, constantes de tiempo, tiempos muertos, etc.)

En el proceso de selección y estimación, es necesario un buen manejo de: la teoría de mediciones, teoría de control, teoría de sistemas (modelos lineales y no-lineales) teoría de señales (Determinísticas y Estocásticas) teoría de la información, estadística y la de aproximaciones estocásticas.

La estimación de las variables y de los parámetros del sistema, se puede usar para: aplicaciones de diagnóstico, de control, reconocimiento de patrones. Los campos de aplicación son: las comunicaciones, potencia, mecánica, aeronáutica, química, física, geología, economía, biología y medicina y -- los problemas relacionados son: la Detección de Señales, Filtrado Optimo, Predicción y Auto-aprendizaje.

Una vez que se ha planteado un modelo, éste debe ser verificado en todas sus propiedades tales como linealidad, orden del modelo, etc. Lo anterior puede hacerse mediante:

La respuesta transitoria, la respuesta en frecuencia, error del modelo, la correlación de los residuos, desempeño del sistema de control. En la medida de lo posible, se debe observar la variación o no-variación del modelo a lo largo de los experimentos antes mencionados.

3.4 Objetivos del modelo.

El modelo de la dinámica del proceso, es útil debido a que permite entender mejor al proceso, lo cual es necesario - para diseñar la forma de compensarlo, para el diseño de procesos nuevos o para modificar los existentes mediante la optimización.

Existe un compromiso entre la complejidad del proceso y la exactitud del modelo, ya que entre más complejo el proceso el modelo es más inexacto, por lo cual debe seleccionarse aquel

de los modelos que represente al proceso con la exactitud razonable y con la complejidad menor, también debe considerarse la aplicación que se dará al modelo, por ejemplo:

- El diseño de un regulador estable.- Aquí un modelo burdo del proceso será más que suficiente.

- Diseño de un programa de control para la transición óptima de un estado a otro.- Se requerirá de un modelo exacto tanto para la característica estática como para la dinámica del proceso además de considerar las no-linealidades y las restricciones.

- Diseño de un regulador el cual minimiza los cambios en las variables del proceso debido a perturbaciones externas.- Además de los requerimientos anteriores se hace necesario un modelo del medio ambiente.

3.5 Planeación del experimento.

A fin de complementar la información disponible se re quiere realizar un experimento previo, en el cual se pueda conocer: las constantes de tiempo más importantes, la magnitud permisible de la señal de entrada, existencia de no-linealidades o de las variaciones con el tiempo del proceso, niveles de ruido, retrasos, tiempos muertos, etc.

Debe diseñarse un experimento complementario de acuerdo a la información existente y modificar lo necesario en función de los resultados obtenidos y detener la experimentación - cuando no se justifique la información que se puede obtener adicionalmente, contra el esfuerzo de un nuevo experimento.

Una vez obtenida la información inicial es más fácil planear los experimentos para definir:

Las variables:

- Señal de entrada
- Frecuencia de muestreo
- Duración del experimento
- Realimentación o malla abierta

Así, cuando se ha definido el fenómeno bajo estudio, se pueden escoger las variables de entrada y de salida. En general las variables de entrada son todas aquellas que pueden modificarse y las variables de salida son aquellas que podemos medir y que afectan al fenómeno de interés.

Cuando se escoge la señal de excitación debe considerarse su amplitud y frecuencia. Si se prefiere la prueba a escalón o la de respuesta a la frecuencia, el método determina la forma de la señal. Entre mayor es la amplitud de la señal de entrada el modelo resulta más exacto, sin embargo debe recordarse que el comportamiento lineal, se presenta en un intervalo reducido.

Se entiende que la exactitud de la identificación depende de la duración del experimento, de manera que este se hace tan largo como sea posible, ya que la variación de las estimaciones es inversamente proporcional a la duración del experimento. No debe omitirse el efecto contrario que tiene la duración en el costo del resultado, de manera que una regla práctica, establece que la duración del experimento debe ser cuando menos 10 veces la mayor de las constantes de tiempo.

También es necesario considerar los efectos de la realimentación en los controladores automáticos o en la intervención del operador ya que las técnicas de correlación no son válidas, si no se tiene cuidado especial o algunas técnicas requieren que el controlador trabaje en malla abierta.

3.5.1 Consideraciones prácticas del proceso de modelado.

Los problemas más comunes son la limitación en los datos, la inexactitud de la estructura del modelo, perturbaciones de carácter desconocido y problemas en las mediciones.

a) En cuanto a los datos:

Existe límite en la extensión del experimento, por tanto en el número de datos.

Existe límite en la amplitud de la señal.

En cuanto a perturbaciones:

Perturbaciones de diferente clase afectan al proceso.

Es difícil modelar satisfactoriamente las perturbaciones.

b) Estructura del modelo:

Los procesos no se conocen adecuadamente otras veces son complejos y esto dificulta encontrar un modelo apropiado.

c) En cuanto a las mediciones:

Estas pueden presentar ruidos inducidos o corrimientos. Algunas variables importantes no se pueden medir en forma directa sino inferencial. El muestreo no es estrictamente instantáneo. Las variables se miden en forma secuencial y no simultáneamente.

En resumen, durante el establecimiento del modelo, hay que recordar que:

a) Frecuentemente es posible hacer experimentos en el sistema a fin de complementar el conocimiento del proceso.

b) El objetivo de obtener el modelo del proceso es diseñar una estrategia de control.

c) Escencialmente debemos decidir:

La clase de modelo (lineal, no-lineal, etc.)

La clase de entradas (flujos, temperaturas, etc.)

El criterio de desempeño (IAE, ISE, etc.)

Así mismo, debemos encontrar respuesta a las preguntas siguientes:

¿Cómo debe ser planeado el experimento?

¿Cómo deben ser analizados los resultados del experimento para encontrar la estrategia de control con las propiedades deseadas?

¿Qué confianza se puede tener en los resultados?

¿Qué tipo de perturbaciones deben ser analizadas - para tener buenos resultados aún con las restricciones de las condiciones experimentales?

¿Se juzgará la exactitud del modelo según las desviaciones de los parámetros, la respuesta en el tiempo, o por el desempeño del sistema de control?

Como se deduce de los planteamientos no existe una sola respuesta y al establecerla debe intervenir la experiencia personal, la información disponible así como una modificación - secuencial, mientras no se obtengan resultados satisfactorios con el modelo actual.

3.6 Procesos industriales más comunes y sus modelos.

Es común denominar procesos de una sola capacitancia a aquellos en los que un solo elemento puede almacenar energía, como el caso de un tanque, que puede almacenar la masa de un fluido o el aislante de la camisa de un reactor que puede almacenar calor. En cambio cuando se analizan conjuntamente la capacidad para almacenar masa y la capacidad para almacenar calor el proceso debe considerarse como uno de capacitancia múltiple.

Así que la primera división se hará en procesos de una sola capacitancia y procesos de capacitancia múltiple.

3.6.1 Procesos de una sola Capacitancia.

Sistema Flúidico.- El sistema consiste de un tanque

al cual entra un flujo de un líquido B y sale un flujo de ese líquido W_s que puede variarse mediante la válvula a la salida. Se puede establecer la relación siguiente:

Flujo que se almacena en el tanque + el flujo que abandona el tanque

$$W_e = W_a + W_s$$

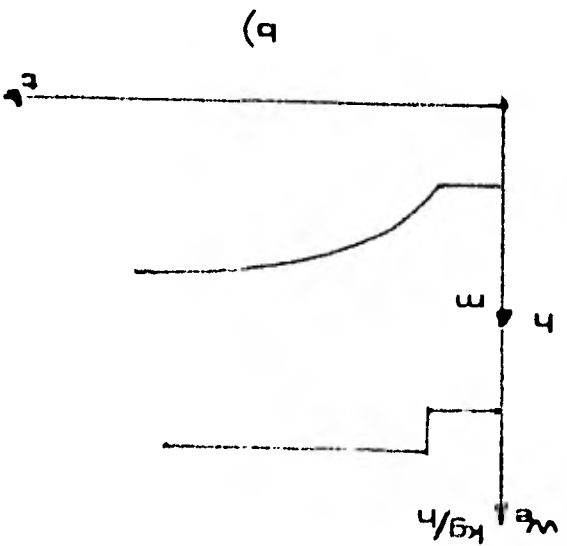
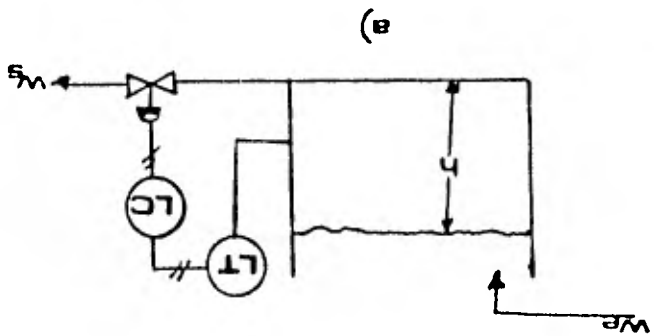


Figura 3.3 Sistema Fluido, proceso de una sola capacitancia a) Proceso b) Curva de respuesta a entrada escalón.

$$W_e = C \frac{dh}{dt} + \frac{h}{R}$$

en Laplace:

$$W_e(s) = C s W(s) + \frac{h(s)}{R}$$

$$\frac{W_e}{H} = \frac{1}{(CS + \frac{1}{R})}$$

multiplicando por R arriba y abajo

$$\frac{W_e}{H} = \frac{RCS + 1}{R} = \frac{S+1}{K}$$

$$t = RC.$$

donde $K = R$

Cuando la entrada es un escalón unitario $U_{-1}(t)$, la salida tiene la forma:

$$h(t) = h_f (1 - e^{-t/\tau})$$

cuyas gráficas en el tiempo, se aprecian en la figura 3.3 b

Sistema térmico. - El proceso consiste de un tanque al cual llega un flujo de un líquido W_e , a una temperatura T_e y se almacena hasta que el flujo de entrada es igual que el flujo de salida. Si el flujo de entrada sufre un cambio de tipo escalón en la temperatura, la misma variable en el flujo de salida será:

$$Q_e = Q_a + Q_s$$

flujo de calor del fluido que entra = flujo de calor almacenado en el tanque + flujo de calor del fluido que abandona el tanque

$$\dot{m} C_e T_e = C \frac{dT_s}{dt} + \frac{T_s}{R} \quad \text{pero } \dot{m} C_e = 1/R.$$

donde \dot{m} = flujo de masa en Kg/s.

$$\frac{T_e}{R} = C \frac{dT_s}{dt} + \frac{T_s}{R}$$

en Laplace:

$$\frac{T_e(s)}{R} = T_s (CS + \frac{1}{R})$$

$$\frac{T_s(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{RCS + 1} \Leftrightarrow \frac{k}{\tau S + 1}$$

la expresión en el dominio del tiempo para la salida T_s cuando la entrada es un escalón unitario $U_{-1}(t)$ es:

$$T_s = T_e (1 - e^{-t/\tau})$$

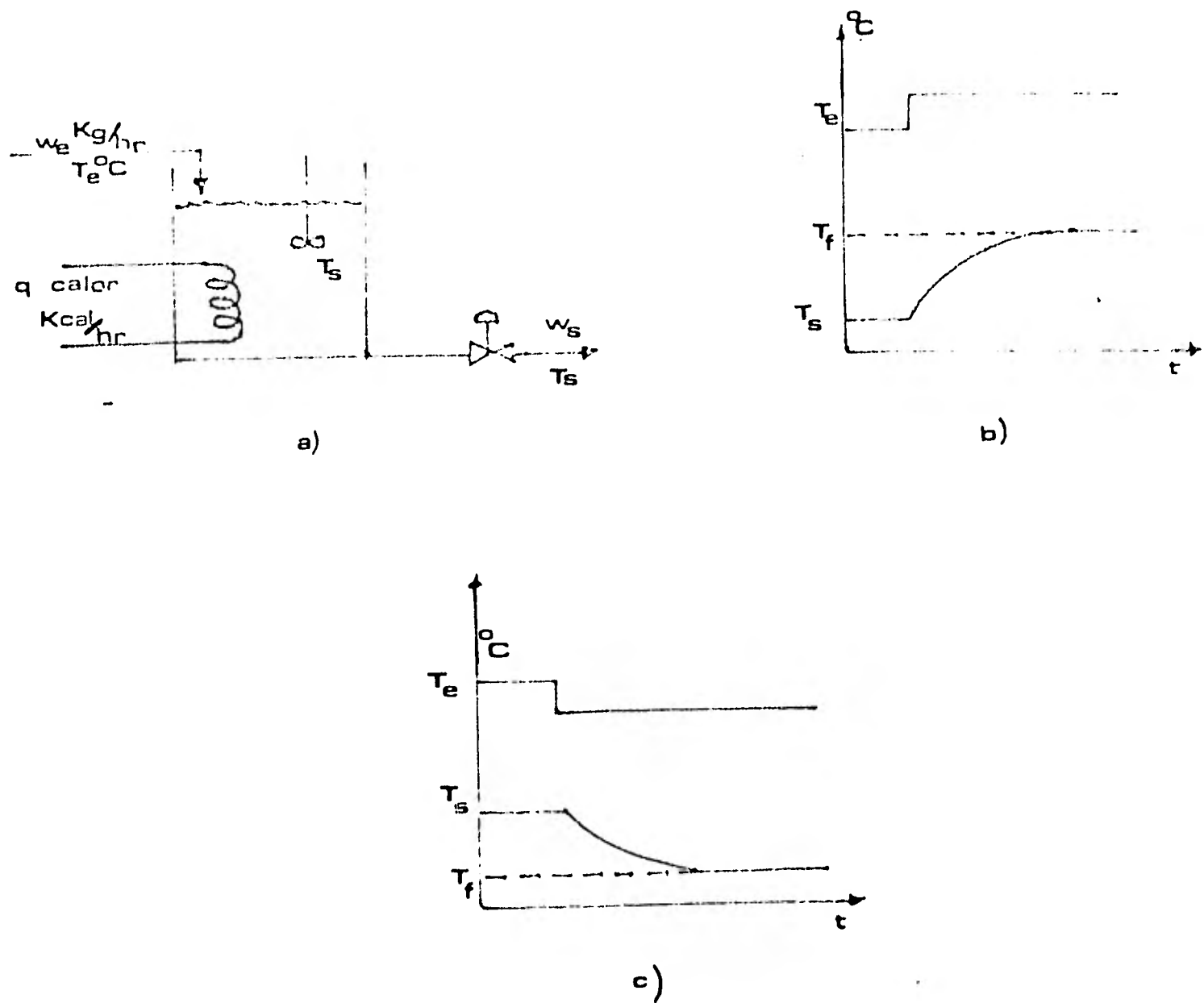


Figura 3.4 Sistema térmico a) Proceso b) Gráficas de entrada-salida cuando aumenta la temperatura c) Gráficas de entrada-salida cuando disminuye la temperatura del fluido de entrada.

Sistema de gas a presión.- El proceso consiste en la modificación en la presión a la salida de una cámara de aire, como consecuencia de los cambios en la presión a la entrada de la misma.

$$q_e = q_a + q_s$$

el flujo másico de entrada = flujo másico que se almacena + flujo másico que sale

$$\frac{P_e}{R} = C \frac{dP_s}{dt} + \frac{P_s}{R}$$

$$P_e(s) = R C S P_s(s) + P_s(s)$$

$$\frac{P_s}{P_e}(s) = \frac{1}{RCS + 1} \Leftrightarrow \frac{K}{\tau S + 1}$$

la expresión en el dominio del tiempo de la salida, cuando la entrada es tipo escalón unitario es:

$$P_s = P_e (1 - e^{-t/\tau})$$

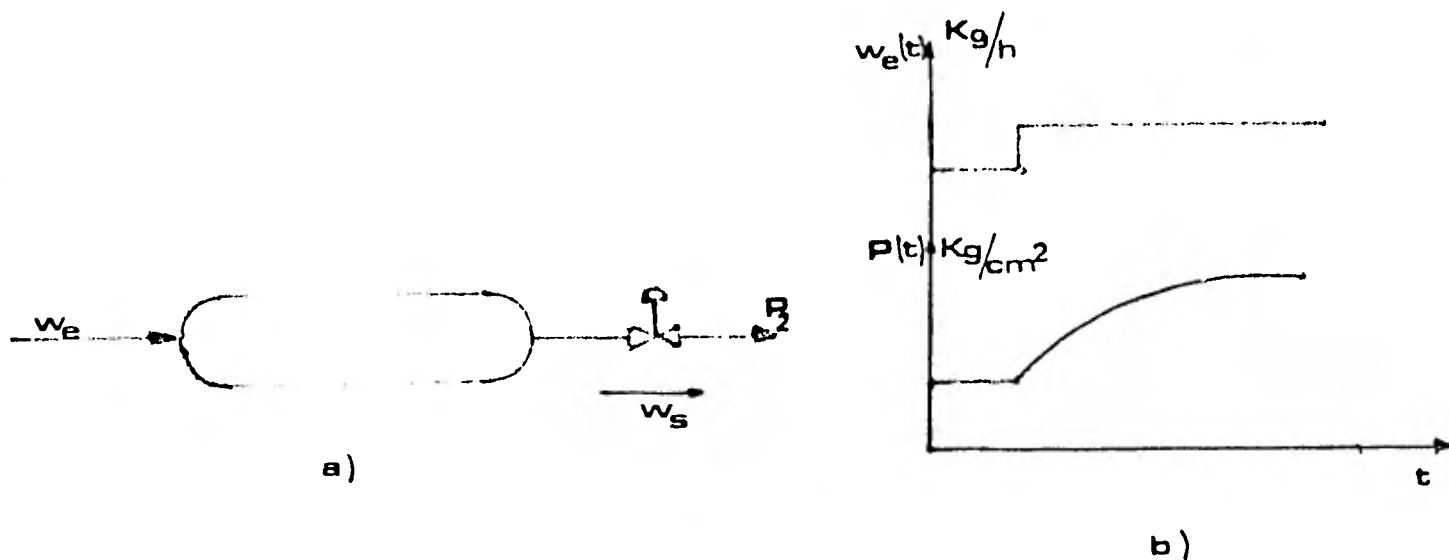


Figura 3.5 Sistema de gas a presión a) Proceso b) Curva de entrada-salida.

Válvula de Control.- Es el dispositivo más utilizado para modificar el estado del proceso y por su efecto sobre el comportamiento dinámico del sistema de control, se analizará su modelo.

Lo que nos interesa es, establecer la relación entre la presión neumática aplicada a la válvula y el desplazamiento de su émbolo.

fuerzas de acción = Σ fuerzas de reacción

$$P_e \cdot A = B \dot{x} + K_r x + m \ddot{x} \quad (\text{se desprecia la masa del émbolo})$$

en Laplace:

$$P_e \cdot A = B S X (s) + K_r X (s)$$

$$P_e = X (s) \left(\frac{B}{A} s + \frac{K_r}{A} \right)$$

$$\frac{X(s)}{P_e(s)} = \frac{A/K_r}{\frac{B}{K_r} s + 1} \quad < = > \quad \frac{K}{\tau s + 1}$$

cuando el cambio en la entrada es tipo escalón el desplazamiento es:

$$X = \frac{P_e \cdot A}{K_r} (1 - e^{-t/\tau})$$

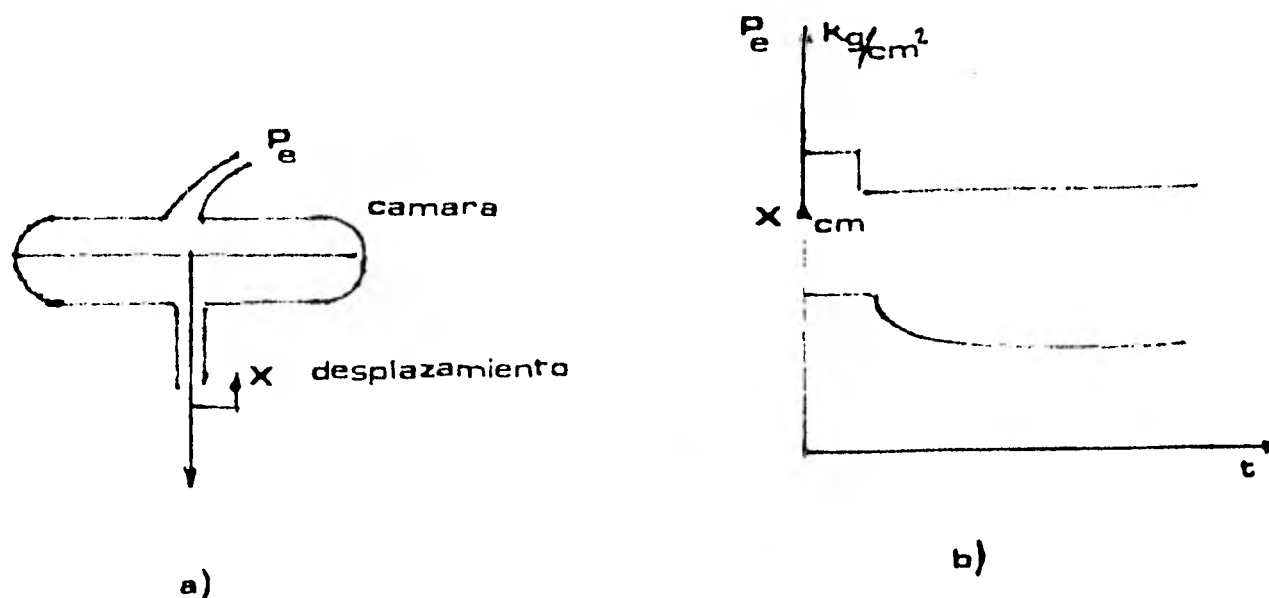


Figura 3.6 Válvula de control y curva de respuesta a un cambio escalón en la presión de entrada.

En general los procesos de una sola capacitancia también denominados sistemas de primer orden, se pueden definir mediante dos parámetros:

K que representa la ganancia del sistema y que nos indica cuanto cambia la salida y (t) por unidad de cambio de la entrada $r(t)$ en estado estable.

τ se llama la constante de tiempo del sistema y nos indica que tan rápido es el proceso, por definición τ es el tiempo al cual ocurre el 63.2% del cambio total de la salida.

Así que el modelo matemático generalizado para un sistema de primer orden es:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = k_r(t) \quad \text{en el tiempo}$$

$$\frac{y(s)}{R(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad \text{en Laplace}$$

Las figuras 3.7 a) y 3.7 b) representan la curva de respuesta generalizada cuando la entrada es un aumento de tipo escalón y una disminución de tipo escalón respectivamente.

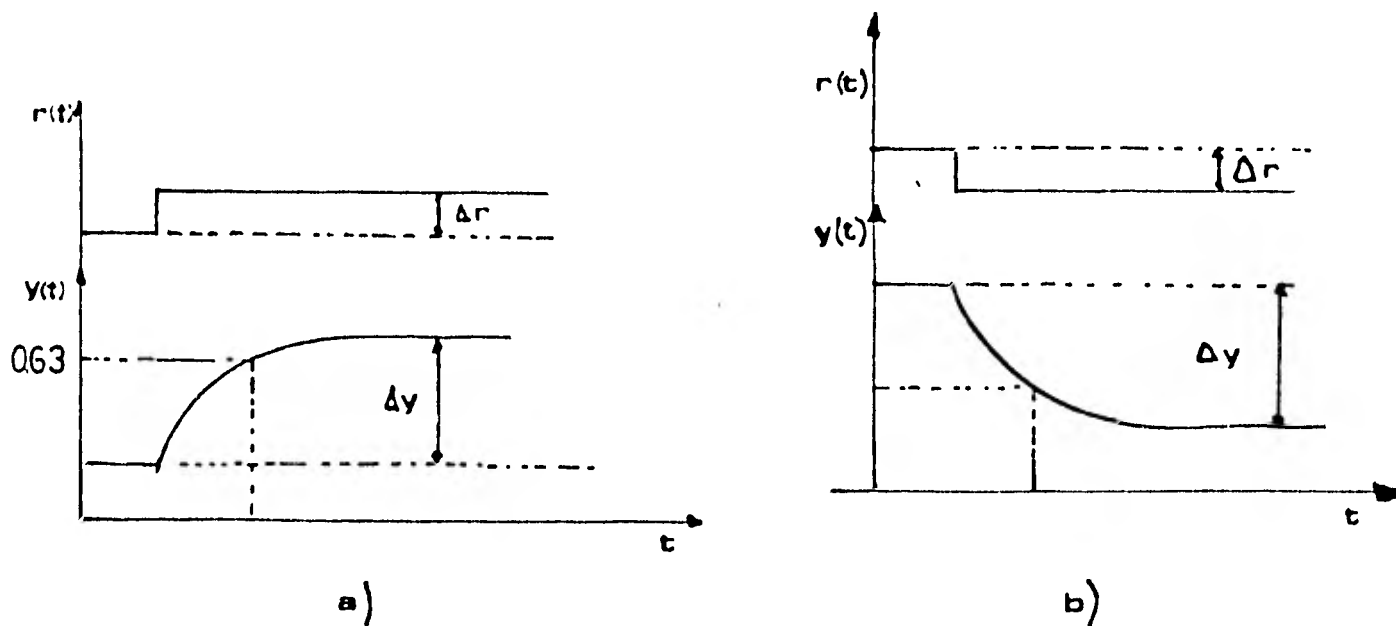


Figura 3.7 Respuesta a entrada escalón de un sistema de primer orden.

La ganancia en el caso de la figura 3.7 a) es:

$$K_1 = \frac{\Delta Y_1}{\Delta r_1} = \frac{\text{cambio en la salida}}{\text{cambio en la entrada}}$$

La ganancia en el caso de la figura 3.7 b)

$$K_2 = \frac{\Delta Y_2}{\Delta r_2} = \frac{\text{cambio en la salida}}{\text{cambio en la entrada}}$$

Dependiendo de las características del sistema, se puede tener el caso de que $K_1 \neq K_2$.

La ecuación en el tiempo que representa $y(t)$ es:

$$Y(t) = K R_0 \left[1 - e^{-t/\tau} \right]$$

donde: $R_0 \hat{=}$ magnitud del escalón de entrada

$K \hat{=}$ ganancia del sistema

así en $t = \tau$

$$Y(\tau) = K R_0 \left[1 - 0.368 \right]$$

$$Y(\tau) = 0.632 K R_0$$

quiere decir que la salida representa el 63.2% del valor final

en $t = \infty$

$$Y(t) = K R_0$$

lo que representa el valor final o de estado estable del sistema.

Obteniendo la derivada de $Y(t)$ y valuando en $t = 0$, es decir, la pendiente en el origen:

$$\left. \frac{dY(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{K R_0}{\tau}$$

Un procedimiento consiste en determinar el valor de estado estable y luego calcular el 63.2% de este valor.

Se determina el tiempo para el cual la curva de respuesta tiene el valor antes calculado y así se determina la constante de tiempo τ .

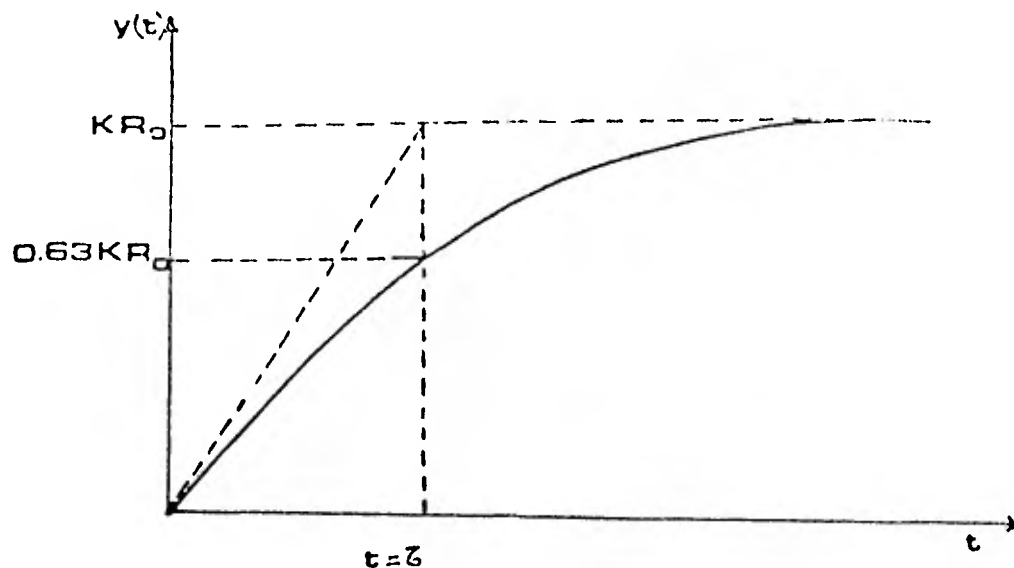


Figura 3.8 Dos procedimientos alternativos para medir la constante de tiempo y la ganancia de un sistema de primer orden a partir de su curva de respuesta a una entrada escalón.

Para determinar la ganancia se requiere conocer la magnitud del escalón de entrada ΔR y midiendo la magnitud en la cual se incrementó la salida ΔY , es posible determinar la ganancia como:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta R}$$

El procedimiento alternativo consiste en trazar la pendiente en el origen de la curva de respuesta y proyectar la intersección de esta recta con la del valor final, en el eje del tiempo, en donde se cumple que $t = \tau$.

La ganancia se determina igual que en el primer procedimiento.

Tiempo Muerto..- Otro parámetro muy importante de los procesos, es el tiempo muerto τ_0 , que constituye el tiempo necesario para que el sistema cambie su salida a partir del instante en que cambió la entrada.

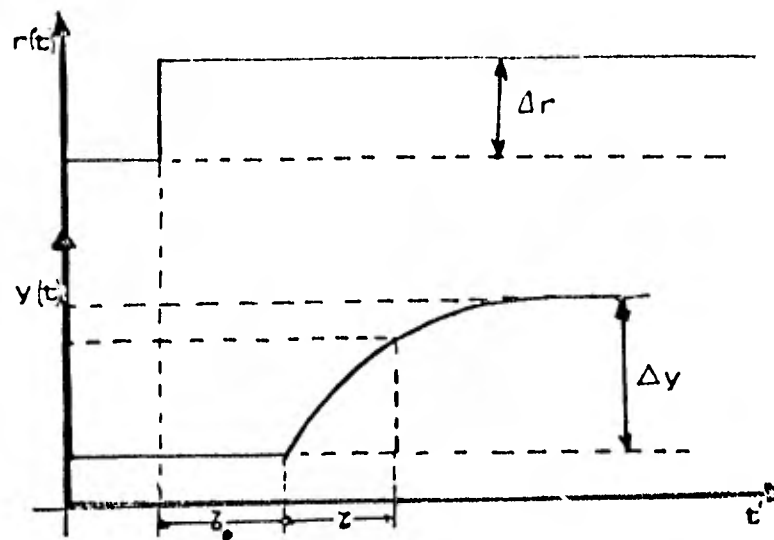


Figura 3.9 Curva de respuesta a entrada esaclón de un sistema de primer orden con tiempo muerto.

En la figura 3.9 se presenta la curva de respuesta de un sistema de primer orden con tiempo muerto. Se pueden mencionar los siguientes ejemplos para aclarar el concepto de tiempo muerto.

Baño de Tina.- Solo cierto tiempo después de haber regulado el agua fría y caliente, la persona que toma el baño sentirá la temperatura final del agua.

Semáforo.- Aún cuando el conductor observe que la luz del semáforo cambió de rojo a verde, no podrá arrancar su automóvil hasta que lo hayan hecho los de los autos que le proceden.

Quando el instrumento de medición y el controlador se montan por separado, existe un retraso (tiempo muerto) por el tiempo que le toma a la información cubrir esa distancia.

Los instrumentos neumáticos son los que trabajan con un tiempo muerto inherente. En la figura 3.10 se presenta -- otro caso en el cual el tiempo muerto se debe a la colocación del instrumento de medición. Compárese la figura 3.10 a) en la cual no se tiene tiempo muerto debido a que el instrumento se monta localmente y la figura 3.10 b) en la cual el instrumento se monta cierta distancia aparte del proceso, ocasionando -

un retraso de tiempo τ_0 para detectar un cambio en la temperatura según se consigna en su curva de respuesta.

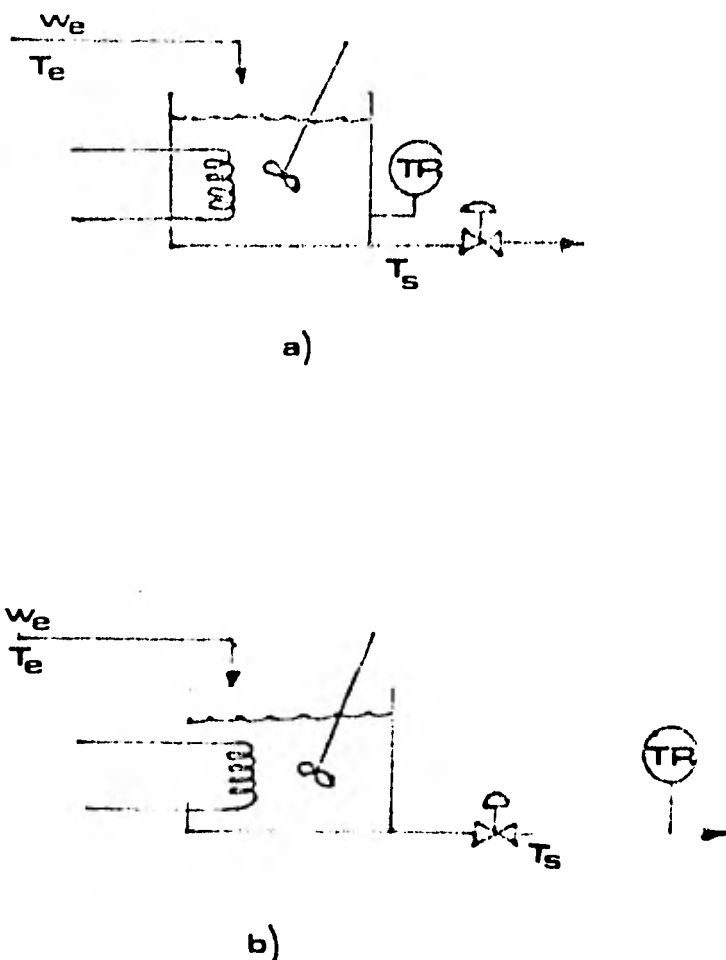


Figura 3.10 El tiempo muerto se debe a la distancia entre el punto de medición y la ubicación del instrumento
 a) sistema sin tiempo muerto τ_0 , b) sistema con tiempo muerto τ_0 .

Debido a que la mayoría de los sistemas de control de procesos implican el estudio para intervalos de perturbación pequeños, se les considera lineales (o se les linealiza) y el tiempo muerto asociado, se puede determinar por medio de la misma curva de respuesta a entrada escalón con que se miden K y τ .

Tomando en cuenta lo anterior, la función de transferencia de un sistema de primer orden y tiempo muerto es de la forma:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K e^{-\tau_0 s}}{\tau s + 1}$$

donde:

$K \hat{=}$ ganancia de estado estable

$\tau \hat{=}$ constante de tiempo

$\tau_0 \hat{=}$ tiempo muerto

Obtención de la función de transferencia a partir de los datos del proceso.- Para encontrar la ganancia (K) y los parámetros dinámicos de un proceso (τ, τ_0) analicemos el sistema fluídico de la figura 3.3a) a guisa de ejemplo y determinemos la función de transferencia entre el nivel del líquido y la posición de la válvula V_p .

Lo primero que se debe hacer es abrir la malla de realimentación, lo cual se puede lograr simplemente poniendo el controlador en modo manual. En seguida se modifica el valor fijado (S.V.) en forma de un escalón y se registra la variación del nivel del tanque y la variación en el porcentaje de movimiento de la válvula lo cual se consigna en las gráficas de la figura 3.11 a).

La ganancia de este proceso se calcula como:

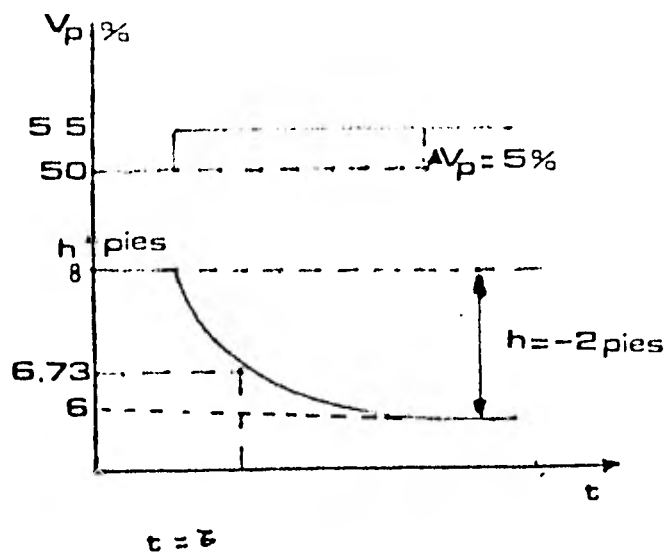
$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta R} = \frac{\Delta h}{\Delta V_p} = \frac{-2 \text{ pies}}{5\% \text{ Mov}} = -0.4 \text{ pies}/\% \text{ mov.}$$

La constante de tiempo se mide de acuerdo a la definición. Es decir, el tiempo que tarda en ocurrir el 63.2% del cambio total.

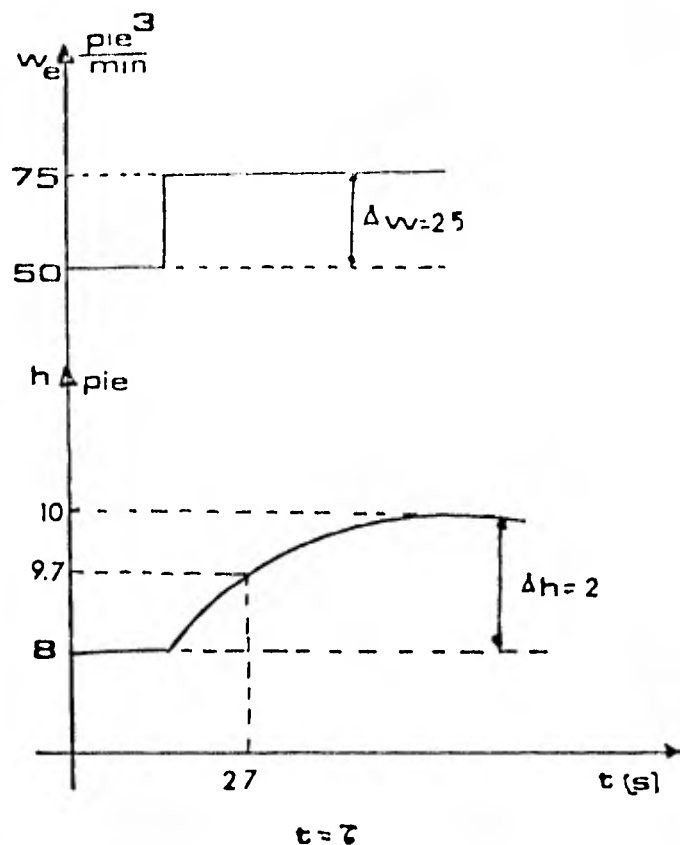
$$\begin{aligned} \text{El } 63.2\% \text{ del cambio total es} &= 0.6324 h = 0.632 (-2) \\ &= 1.264 \text{ pies} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{En este instante el nivel es} &= 8.0 - 1.264 \\ &= 6.7 \text{ pies} \end{aligned}$$

De la curva de respuesta encontramos el tiempo en el cual se tiene el nivel de 6.7 pies, como se muestra en la gráfica $\tau = 10 \text{ seg.}$



a)



b)

Figura 3.11 Curva de respuesta del control de nivel a) en función de la posición de la válvula (V_p) b) en función del gasto de entrada.

Así la función de transferencia resultante es:

$$\frac{H(s)}{V_p(s)} = \frac{-0.4}{10s + 1}$$

Realmente existen distintas ganancias y constantes de tiempo en cada proceso, lo anterior nos indica como cambia el nivel del tanque (h) por unidad de cambio de la posición de la válvula (V_p) y la constante de tiempo τ nos dice que tan rápido sucede. Pero si queremos conocer cómo afecta el gasto del fluido de entrada al proceso, primero debemos poner el controlador en modo manual y dejarlo así. Después debe cambiar el gasto -- del fluido de entrada de alguna manera y a partir de las gráficas de la figura 3.11 b) se procede como en el caso anterior.

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta R} = \frac{\Delta h}{\Delta \omega_e} = \frac{2 \text{ pies}}{25 \text{ pies}^3/\text{min}} = 0.08 \text{ pies}/(\text{pies}^3/\text{min.})$$

$$\begin{aligned} \text{el } 63.2\% \text{ del cambio total es} &= 0.632 (2) \\ &= 1.264 \text{ pies} \end{aligned}$$

en ese instante el nivel es = $8 + 1.264 = 9.3$ pies y el instante de tiempo en el cual se presenta el nivel anterior

$$\tau = 27 \text{ seg} - 20 \text{ seg} = 7 \text{ seg.}$$

y la función de transferencia:

$$\frac{H(s)}{W_e(s)} = \frac{0.08}{7s+1} \text{ pies}/(\text{pies}^3/\text{min.})$$

Por lo anterior se deben escoger las dos variables a relacionar antes de expresar la función de transferencia.

A continuación se presenta el ejemplo de un reactor de Polietileno C_2H_4 el cual se representa en la figura 3.12 a). En este diagrama se representan los instrumentos siguientes:

MIT $\hat{=}$ sensor y transmisor del índice de fusión.

MIC $\hat{=}$ controlador del índice de fusión.

Suponga que se necesita controlar el índice de fusión del producto de polietileno del reactor, lo cual se logra usualmente midiendo el índice de fusión y manipulando el gasto de algún tipo de catalizador a la entrada del reactor. Debido a que el reactor opera a alta presión es imposible analizar el plástico a la salida del reactor, por ello necesitamos una válvula reductora, la cual se debe ubicar algo aparte del reactor por razones de seguridad. Para diseñar el sistema de control, debe-- aplicar la técnica de la "Prueba a escalón".

- 1.- Se pone el MIC en modo manual.
- 2.- Se modifica la posición de la válvula para el catalizador en 20%.
- 3.- Se gráfica el índice de fusión del producto.

De la figura 3.12 b) se tiene:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta R} = \frac{\Delta MI}{\Delta V_p} = \frac{1.68 \text{ MI}}{20\% \text{ mov.}} = 0.084 \text{ MI}/\% \text{ mov}$$

$$0.632 \Delta MI = 1.06$$

$$MI(\tau) = 1.57 + 1.06 = 2.63$$

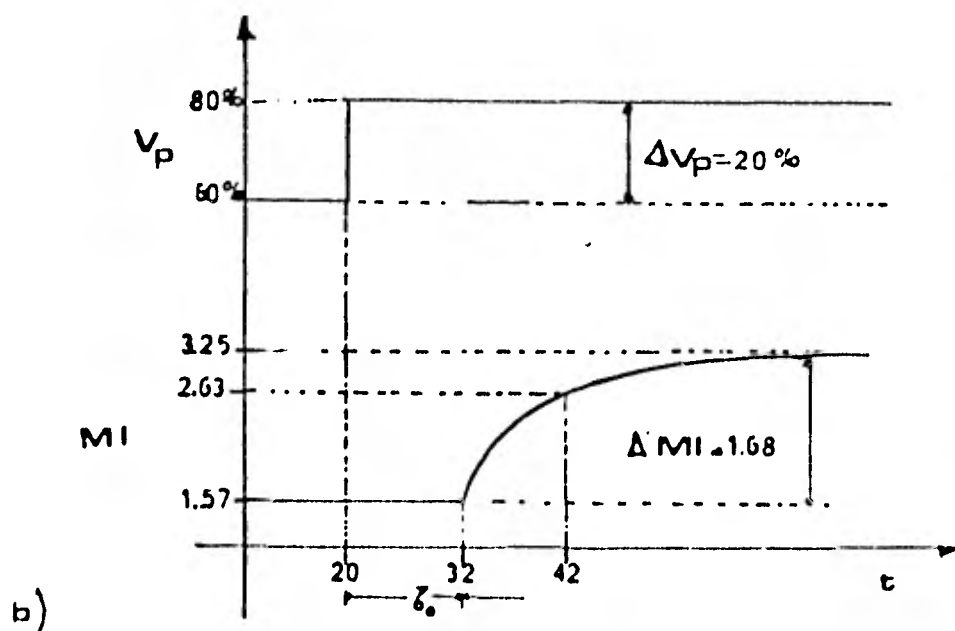
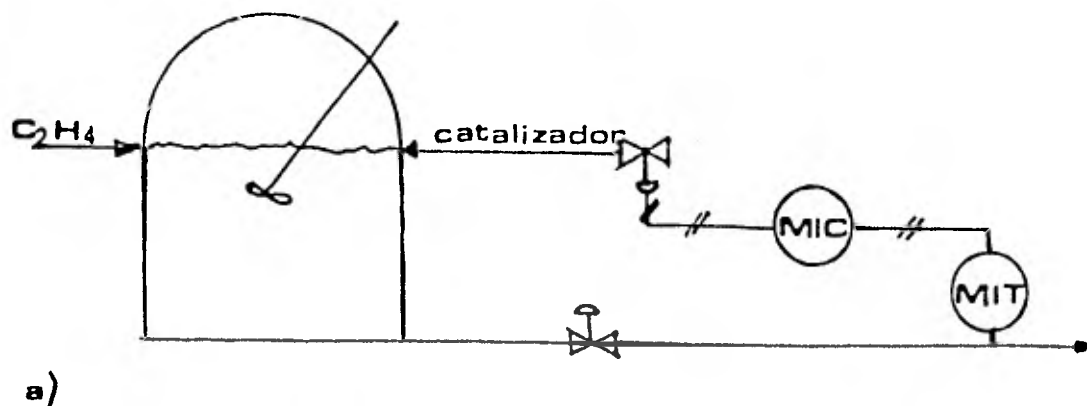
cuando $MI = 2.63$ se tiene $t = 42$
de la figura se mide

$$\tau_0 = 32 - 20 = 12 \text{ seg.}$$

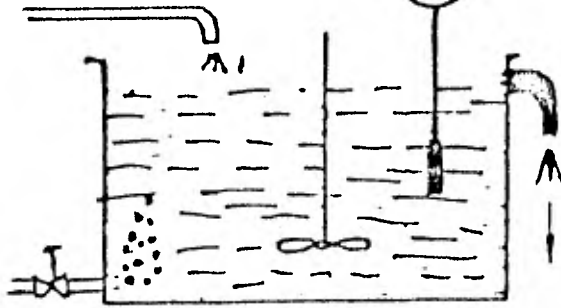
$$\tau = 42 - 32 = 10 \text{ seg.}$$

sustituyendo los valores, la función de transferencia queda:

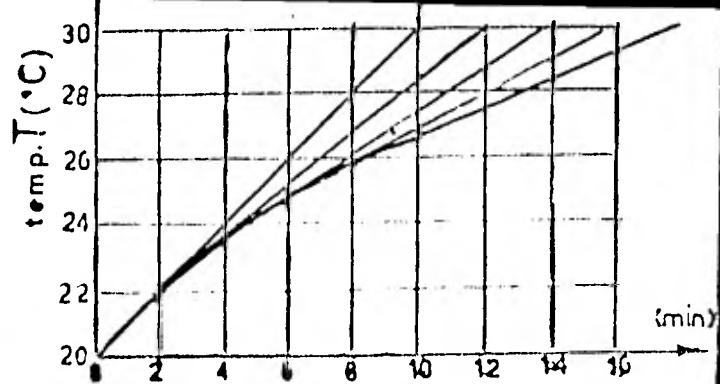
$$\frac{MI(s)}{V_p(s)} = \frac{0.084 e^{-12s}}{10s + 1}$$



AGUA

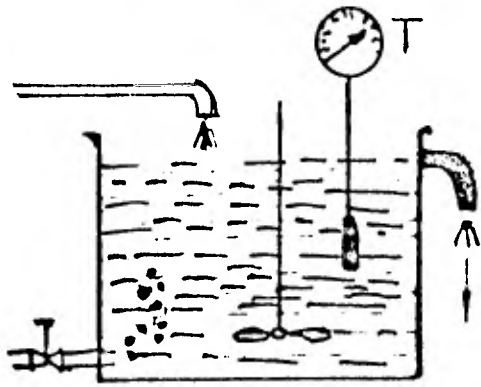


a)

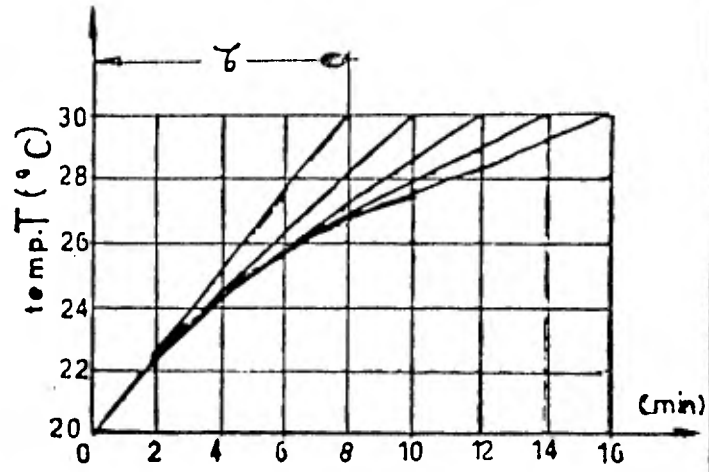


100

10

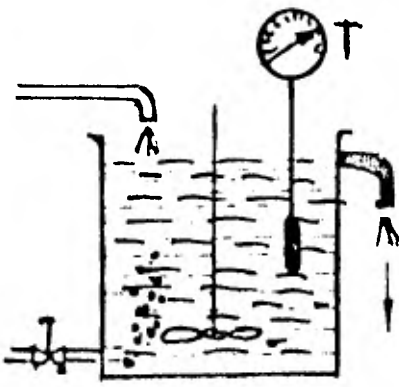


b)

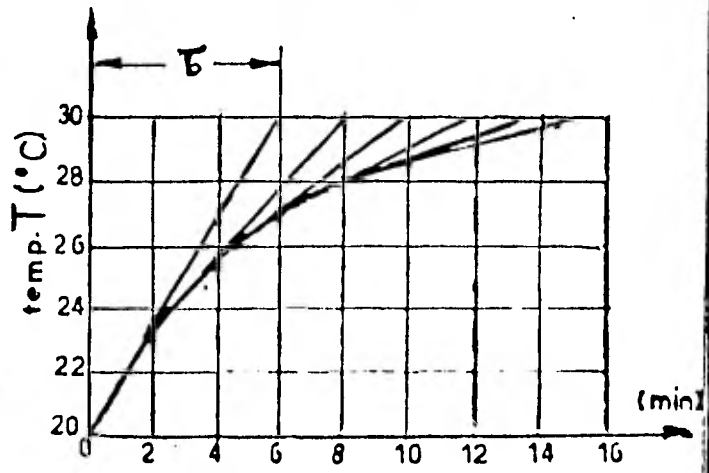


80

8

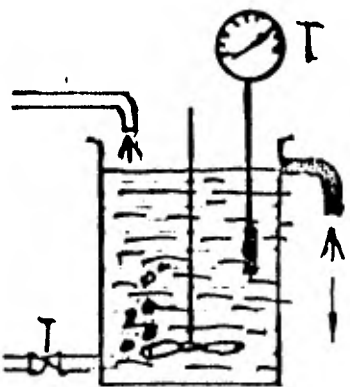


c)

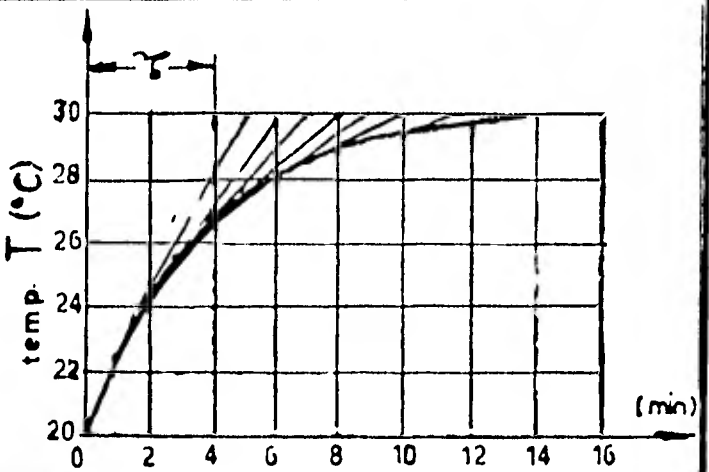


60

6

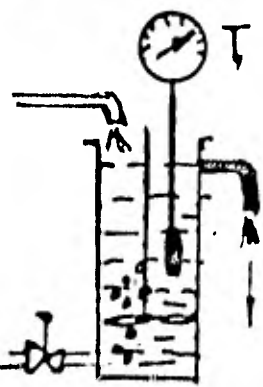


d)

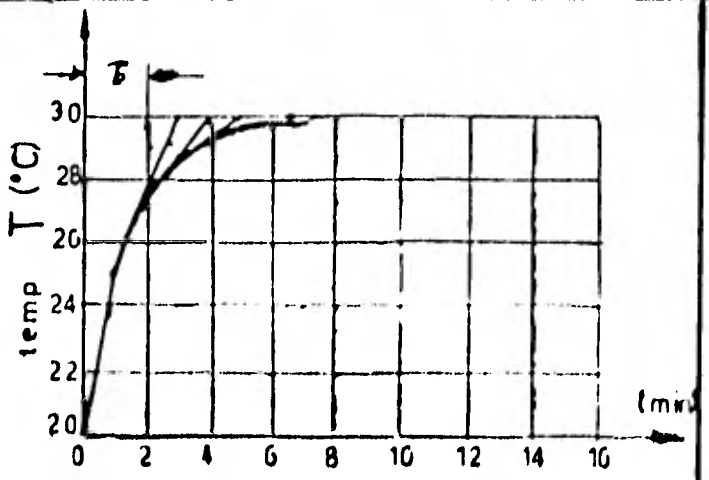


40

4



e)



20

2

A fin de aclarar como la constante de tiempo depende de las dimensiones de los equipos de proceso en la figura 3.13, se presenta la disminución de la constante de tiempo de un sistema térmico cuando se disminuye el volumen del tanque de almacenamiento. El termómetro T marca la temperatura del líquido en el interior del tanque al lado derecho se presenta la curva de respuesta para un cambio de tipo escalón en la temperatura del líquido de entrada, en la columna siguiente se registra el volumen del tanque y en la última columna el valor de la constante de tiempo que corresponde a cada caso.

3.6.2 Procesos de Capacitancia Múltiple.

Se mencionó anteriormente que cuando más de un elemento tiene capacidad de almacenamiento, la dinámica del proceso depende de la manera en que interactúan, dichas capacitancias. En la figura 3.14 a) se presenta un sistema hidráulico en el cual la capacitancia del primer tanque no interactúa con la del segundo, debido a que el flujo a la salida del primer tanque, es independiente de la altura del nivel en el segundo. Sin embargo, en la figura 3.14 b) se presenta un sistema hidráulico en el cual los niveles de ambos tanques interactúan, debido a que cualquier cambio en el nivel del tanque de la derecha afectará el nivel del tanque a la izquierda.

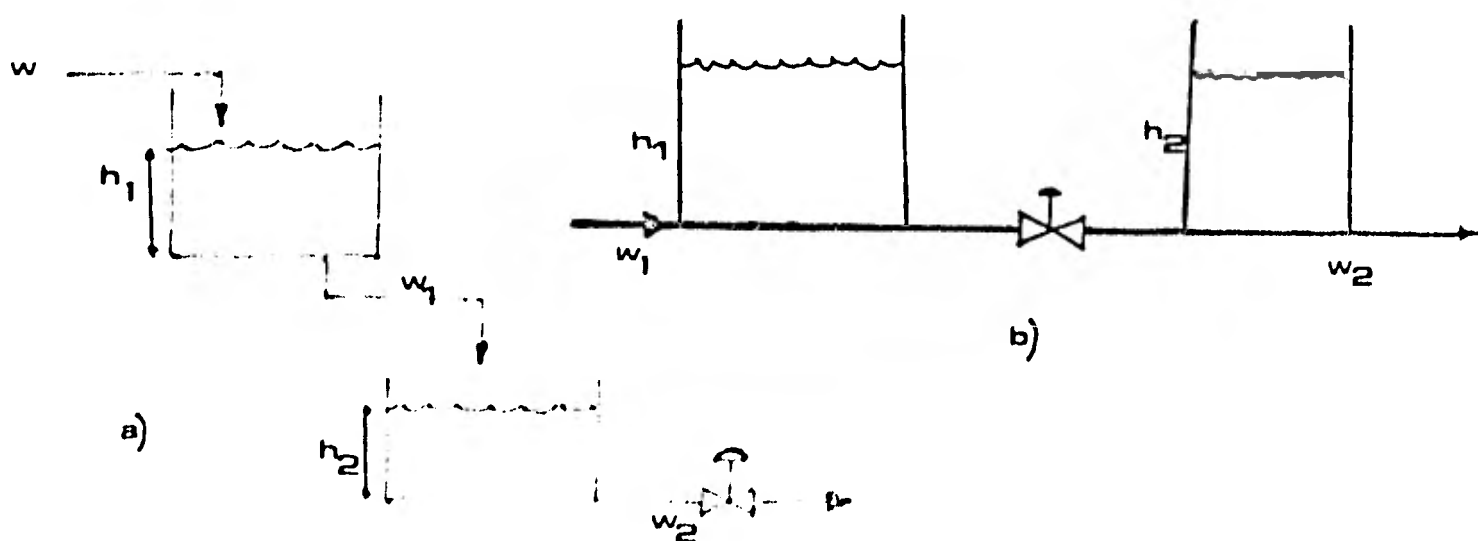


Figura 3.14 Sistemas de capacitancia múltiple a) sin-interacción
b) con interacción

Cuando se dice que interactúan, significa que se modifican las constantes de tiempo individuales y la magnitud del cambio de las constantes de tiempo, es extraordinaria. En general se aplican las reglas siguientes cuando se presenta interacción.

. El grado de interacción, es proporcional a la relación de la menor a la mayor de las capacitancias (no constantes de tiempo). Cuando la relación es menor de 0.1 se puede suponer que no existe interacción.

. Cuando existe interacción, la constante de tiempo mayor incrementa su valor, y la constante de tiempo más pequeña lo disminuye.

. Específicamente en los sistemas de igual constante de tiempo e igual capacitancia, el efecto que resulta, es una combinación de una constante de tiempo grande o dominante, y varias constantes de tiempo pequeñas, cuya suma normalizada es:

$$\frac{n}{\sum_{i=1}^n} \frac{\tau_i}{\tau} = \frac{n^2+n}{2}$$

donde $n \hat{=}$ número de capacitancias y su producto normalizado es:

$$\frac{n}{\prod_{i=1}^n} \tau \frac{\tau_i}{\tau} = 1.0$$

Un caso particular es cuando $n = 2$

$$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau} = 2.618 + 0.382 = 3$$

puesto que $n = 2$ $\frac{n^2 + n}{2} = 3$

$$Y \quad \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau} = (2.618) (0.382) = 1.0$$

otro con tres capacitancias de constante de tiempo $\tau_{1,2,3}$ respectivamente de tiene:

$$\frac{\tau_1}{\tau} = 5.0505, \quad \frac{\tau_2}{\tau} = 0.6405, \quad \frac{\tau_3}{\tau} = 0.3090$$

$$\frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{\tau} = 6$$

$$\frac{\tau_1}{\tau} + \frac{\tau_2}{\tau} + \frac{\tau_3}{\tau} = 1$$

En el caso de no existir interacción, el comportamiento de n capacitancias independientes con constante de tiempo τ , puede estimarse por las relaciones de fase. Si la fase de cada etapa es:

$$\phi = - \tan^{-1} \left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} \right)$$

el ángulo de fase total es $n \phi$

$$n \phi = - n \tan^{-1} \left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} \right)$$

Nunca se tienen ángulos de fase mayores de 180° , y en este caso $\phi = - \frac{\pi}{n}$. Si n es grande, ϕ se hace más pequeño y recordando que la tangente de un ángulo pequeño es aproximadamente igual al ángulo se tiene:

$$\lim_{\phi \rightarrow 0} \left(-\tan^{-1} \left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} \right) \right) = - 2\pi \frac{\tau}{\tau_0}$$

o para n etapas

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \phi = - 2\pi n \frac{\tau}{\tau_0}$$

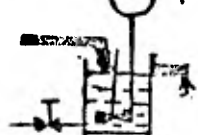
Lo anterior indica que a un número grande n de etapas independientes, con constante de tiempo τ , se tiene una característica de fase como la de un tiempo muerto de valor " $n\tau$ ".

Por lo anterior el comportamiento conjunto de las n etapas se puede representar como un proceso de una sola capacitancia y un tiempo muerto.

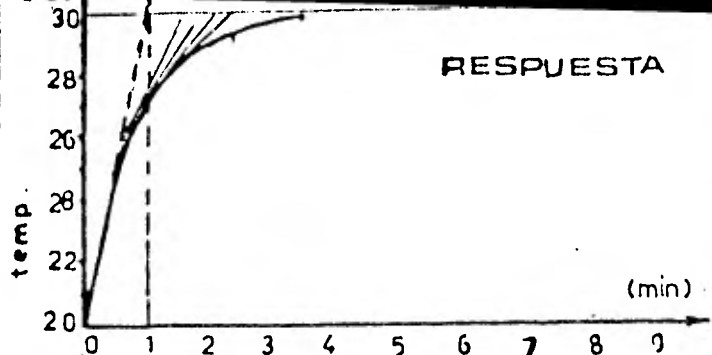
Sistema Flúidico.- Analicemos lo que sucede si aumentamos el gasto de entrada del primer tanque en el proceso

SISTEMA

RESPUESTA



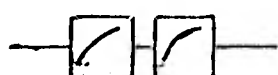
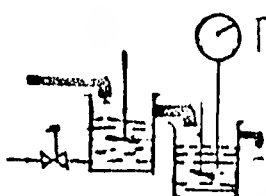
a)



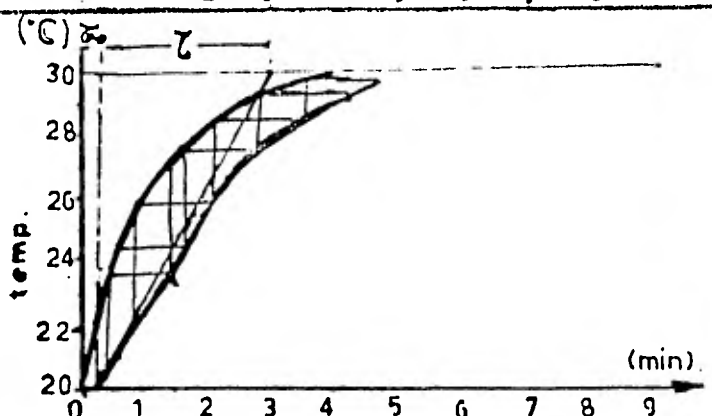
1

0

1



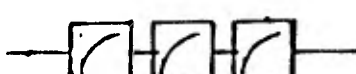
b)



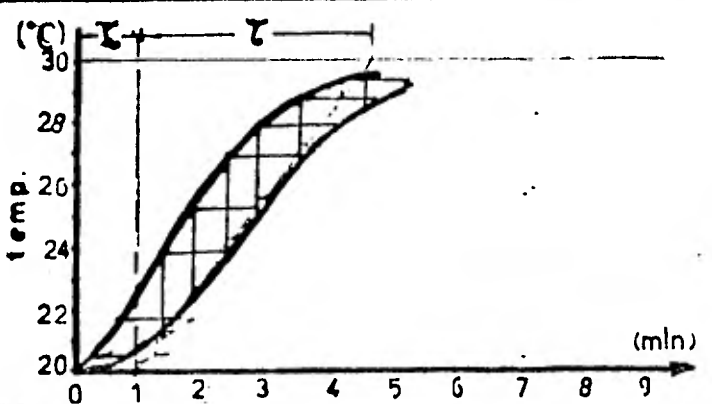
2

0.3

2.6



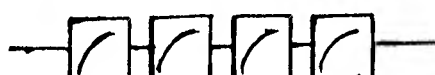
c)



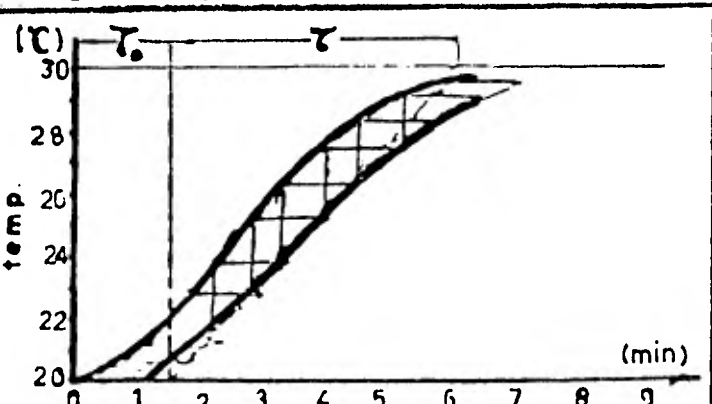
3

0.87

3.6



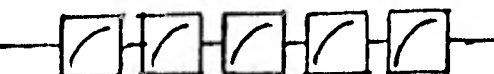
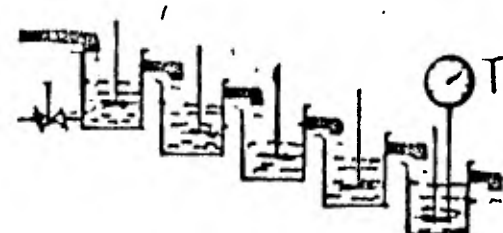
d)



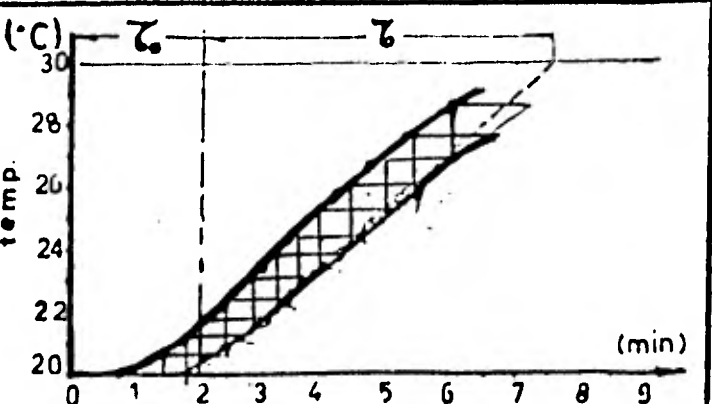
4

1.44

4.5



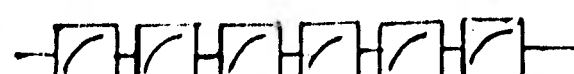
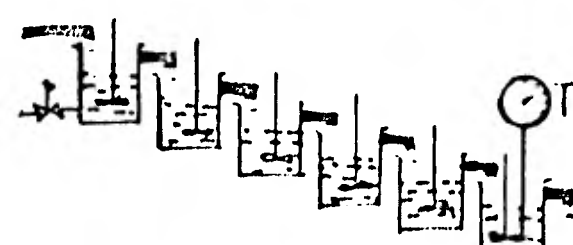
e)



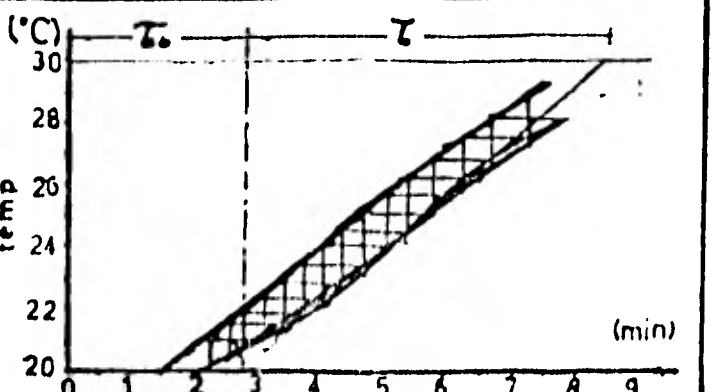
5

2.1

5.3



f)

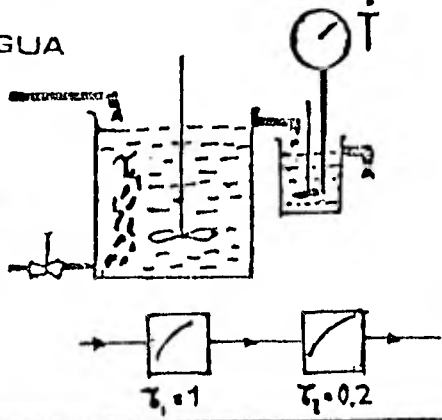


6

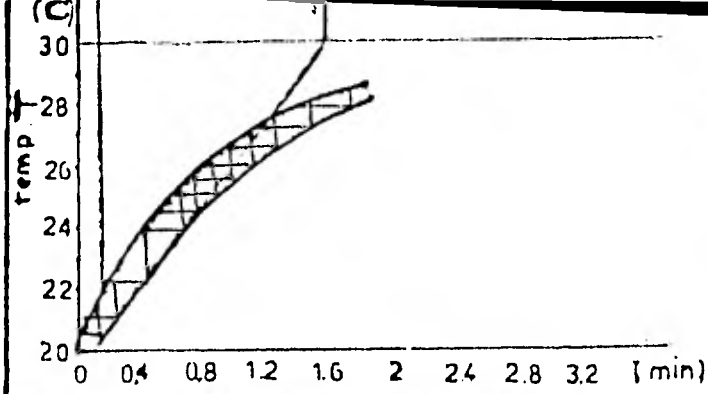
2.85

5.75

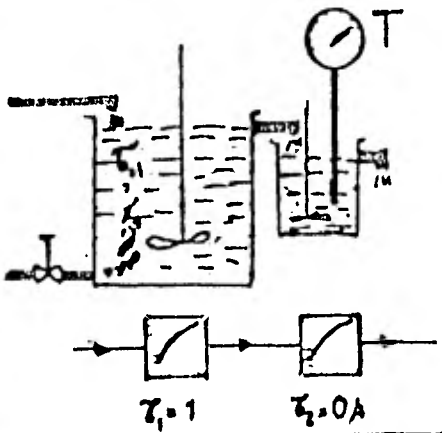
AGUA



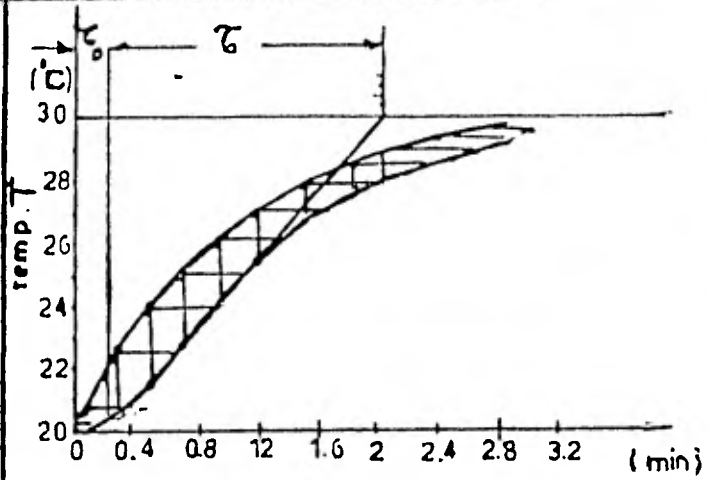
a)



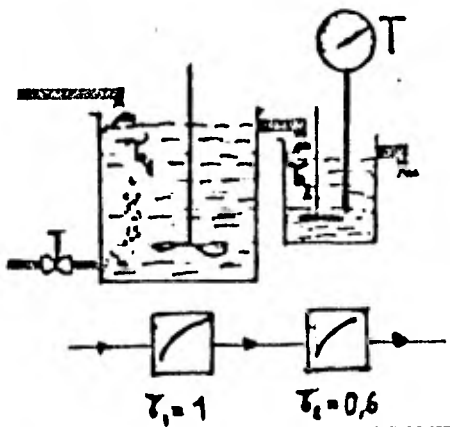
1 0.2 0.11 146



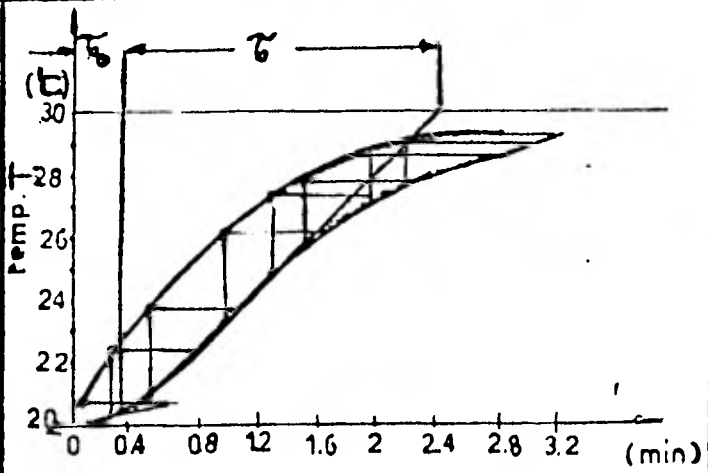
b)



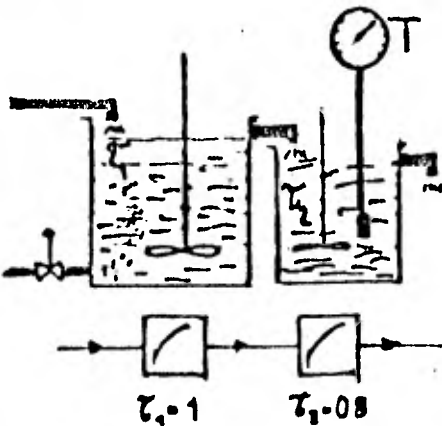
1 0.4 0.17 176



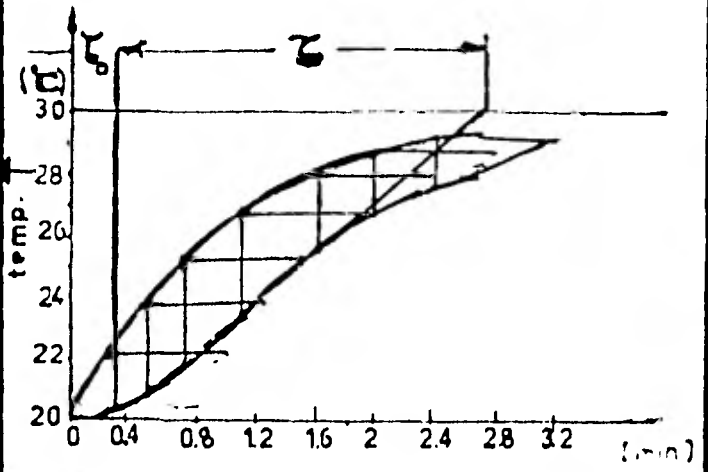
c)



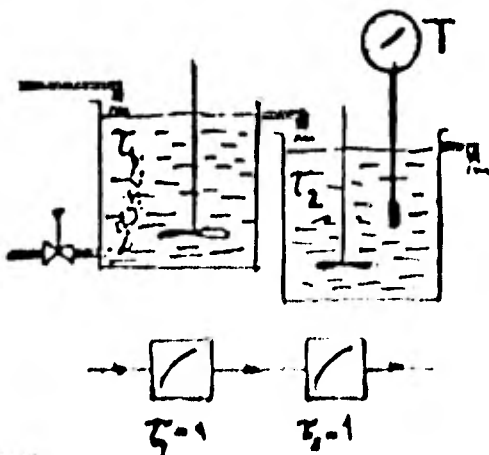
1 0.6 0.21 205



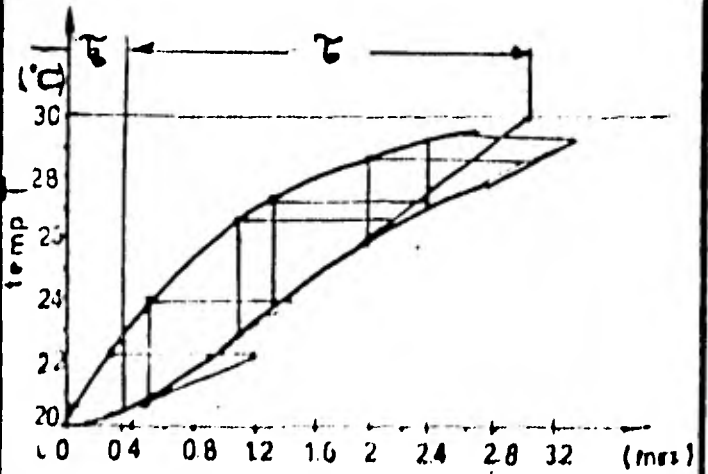
d)



1 0.8 0.26 235



e)



1 1 0.3 26

mostrado en la figura 3.14 a). Vemos que la función de transferencia del primer tanque está dada por:

$$\frac{w_1}{w_e} (s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}$$

y la función de transferencia del segundo tanque es:

$$\frac{H_2}{W_e} = \frac{H_2}{W_1} \cdot \frac{W_1}{W_e} = \frac{K_2}{(\tau_2 s + 1)} \cdot \frac{K_1}{(\tau_1 s + 1)}$$

ó

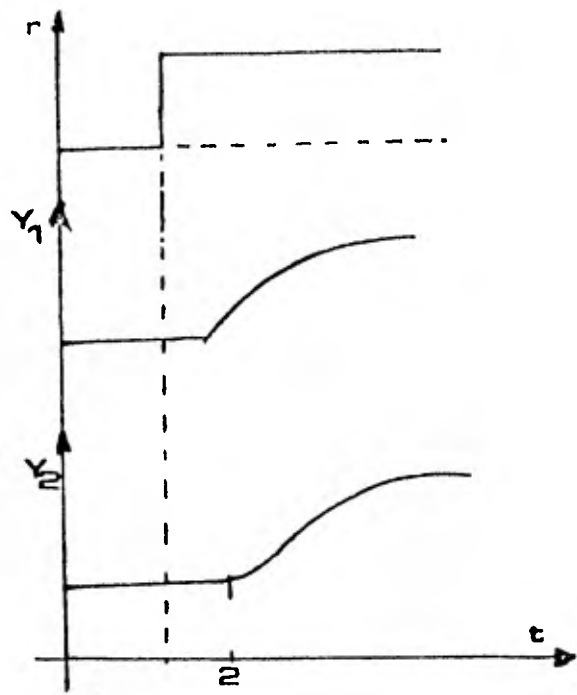
$$\frac{H_2}{W_e} = \frac{K_1 K_2}{(\tau_1 s + 1) (\tau_2 s + 1)} = \frac{K}{(\tau_1 s + 1) (\tau_2 s + 1)}$$

De lo anterior puede observarse que se requiere de más tiempo a fin de que empiece a reaccionar un proceso de capacitancia múltiple, con respecto al de una sola capacitancia.

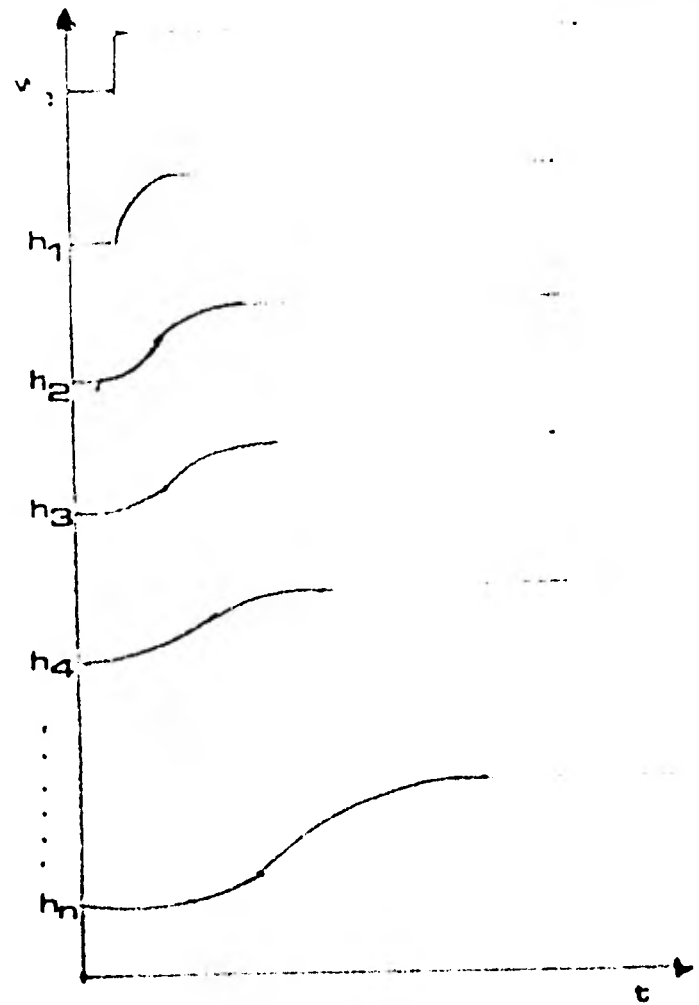
En la figura 3.15 a) se muestran las curvas tanto para el gasto de entrada como para el nivel en el tanque 1 y en en tanque 2. Es interesante notar la diferencia entre la pendiente inicial del cambio de nivel en el tanque 1 y en el tanque 2.

En general se puede establecer que, la respuesta del sistema tarda más y más conforme se conectan más y más procesos de una sola capacitancia en cascada. En la figura 3.15 b) se muestran las curvas de respuesta para un proceso hidráulico de n capacitancias. La importancia de la discusión anterior desde el punto de vista de control, puede aclararse si se observan los dos sistemas representados en la figura 3.16.

En ambos procesos, se controla el nivel del último tanque, sin embargo es más fácil controlar el proceso de la figura 3.16 a), debido a que el proceso de la figura 3.16 b) requiere de mayor tiempo para reaccionar a un cambio en el gasto de entrada W_e , según se ve en la figura 3.15 b).



a)



b)

Figura 3.15 Curva entrada-salida para un sistema de nivel de dos capacitancias.

Sistema Térmico.- Como otro ejemplo de un proceso de capacitancia múltiple, tenemos el proceso térmico de la figura 3.17.

El proceso consiste en controlar la temperatura del reactor mediante el flujo de agua a través de la camisa. Si la temperatura del agua de entrada cambia en alguna cantidad - con la figura ΔT_{ji} , la temperatura del reactor también cambiará en ΔT_R , pero aún no podemos decir que tan rápido sucede este último cambio, debido a que antes de que el cambio de temperatura afecte al contenido del reactor debe pasar por dos sistemas de una sola capacitancia (o retrasos). En otras palabras

primero cambia la temperatura de la camisa (T_j), primera capacitancia, y después la temperatura de la pared metálica, (T_m), segunda capacitancia. Finalmente la temperatura del contenido del reactor (T_R) cambiará comportándose, como otro proceso de una capacitancia. Las curvas de respuesta para las temperaturas en el reactor, se presentan en la figura 3.17 b. y la función de transferencia para las temperaturas de las tres etapas es:

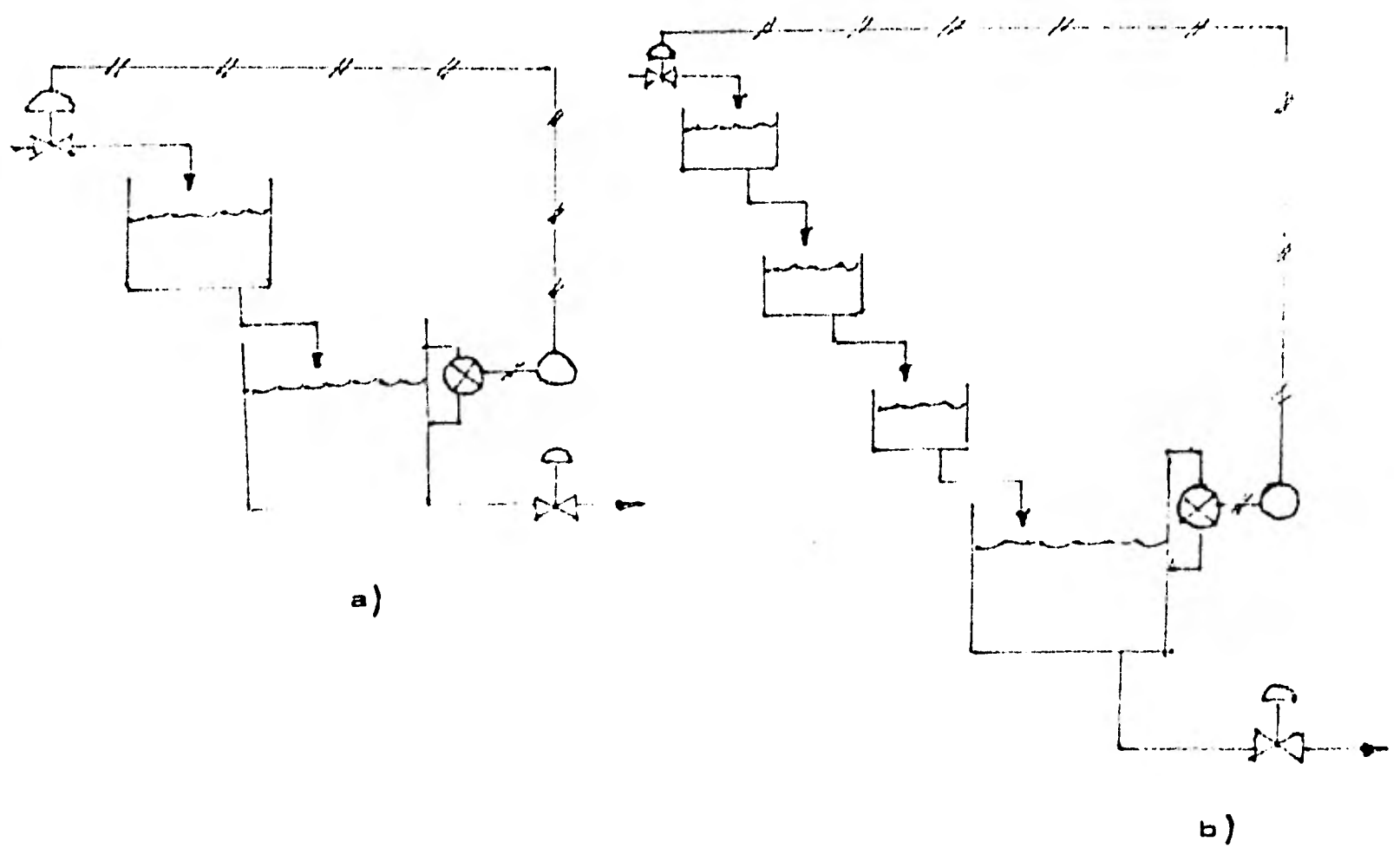


Figura 3.16 Controlabilidad de dos sistemas de nivel a) Dos capacitancias en cascada b) "n" capacitancias en cascada.

camisa - agua

$$\frac{T_j(s)}{T_{ji}(s)} = \frac{K_j}{\tau_j s + 1}$$

pared metálica-agua.

$$\frac{T_m(s)}{T_{ji}(s)} = \frac{K_j K_m}{(\tau_j s + 1)(\tau_m s + 1)}$$

contenido del reactor-agua

$$\frac{Tr(s)}{T_{ji}(s)} = \frac{K_j K_m K_R}{(\tau_j s + 1)(\tau_m s + 1)(\tau_R s + 1)} \quad 6$$

$$\frac{Tr(s)}{T_{ji}(s)} = \frac{r}{(\tau_j s + 1)(\tau_m s + 1)(\tau_R s + 1)}$$

En el proceso térmico de capacitancia múltiple, toma más tiempo para que la variable T_R comience a reaccionar, que uno de una sola capacitancia. Es decir, transcurre más tiempo para que reaccione T_R , que el que toma para que lo haga T_j , que es la temperatura asociada a la primera capacitancia en este proceso.

Como puede notar, se involucran varias constantes de tiempo (τ_i) en la función de transferencia para describir a un proceso de capacitancia múltiple, por lo que ninguna de las constantes de tiempo, tiene el mismo significado que la τ de un proceso de una sola capacitancia. Lo único que podemos decir del tiempo de respuesta de un proceso de capacitancia múltiple, es que conforme las constantes de tiempo (τ_i) sean más pequeñas, el proceso es mucho más rápido.

En la sección 3.7 se darán algunas técnicas para encontrar las constantes de tiempo para sistemas hasta de segundo orden, o de dos capacitancias, así como el tiempo muerto asociado, de manera que la función de transferencia de un sistema de dos capacitancias y tiempo muerto sería la siguiente y sus curvas de respuesta las que se representan en la figura 3.18.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_1 K_2 e^{-\tau_0 s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

Como ya se mencionó con anterioridad, dependiendo de la aplicación que se dé al modelo, es la precisión requerida. La aproximación mediante un sistema de primer orden, o de una sola capacitancia, y tiempo muerto es suficiente a fin de se-

leccionar los ajustes de los parámetros de los controladores P, PI o PID empleados comunmente.

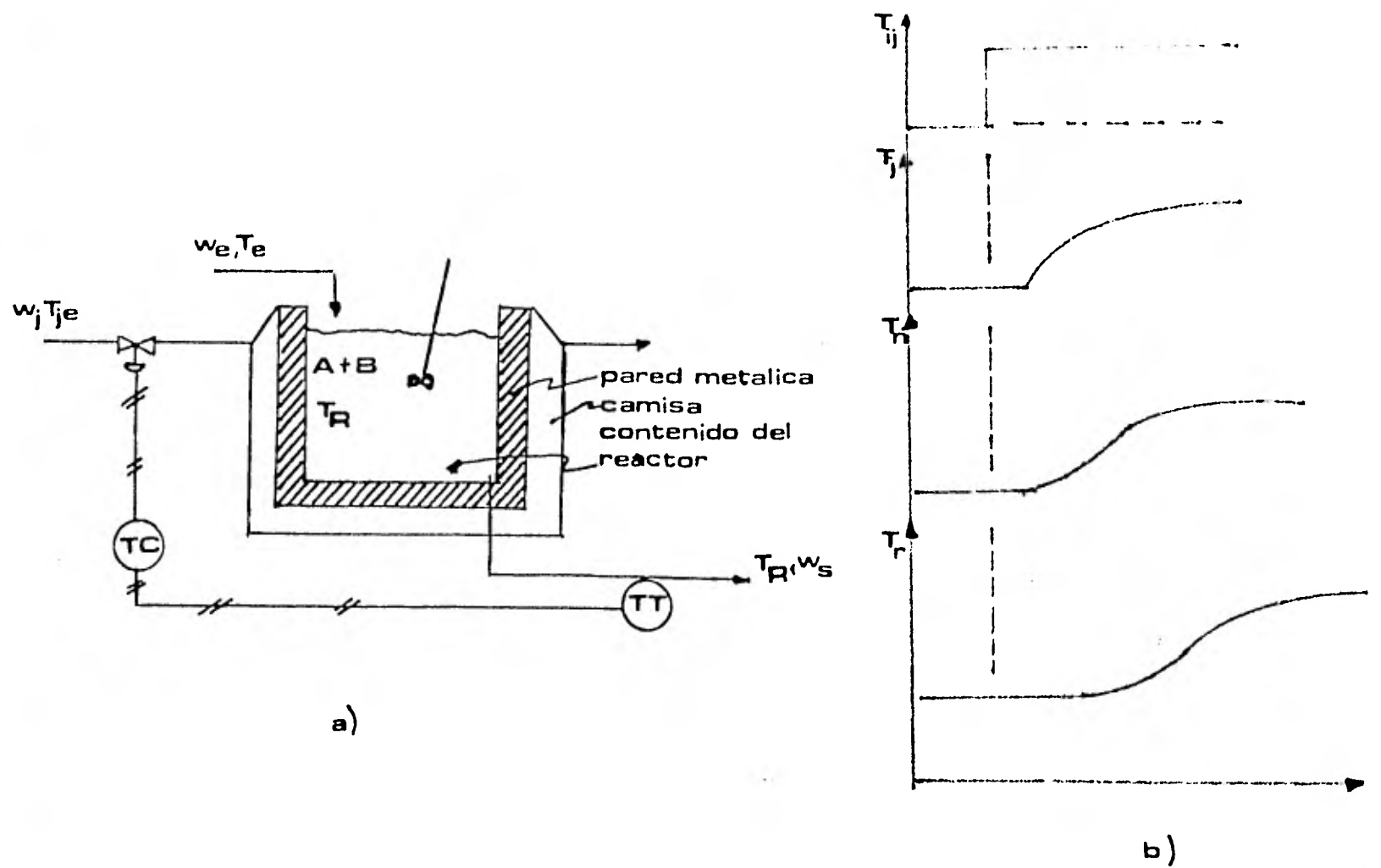


Figura 3.17 Sistema Térmico a) Proceso b) Pérofiles de temperatura en las diferentes etapas.

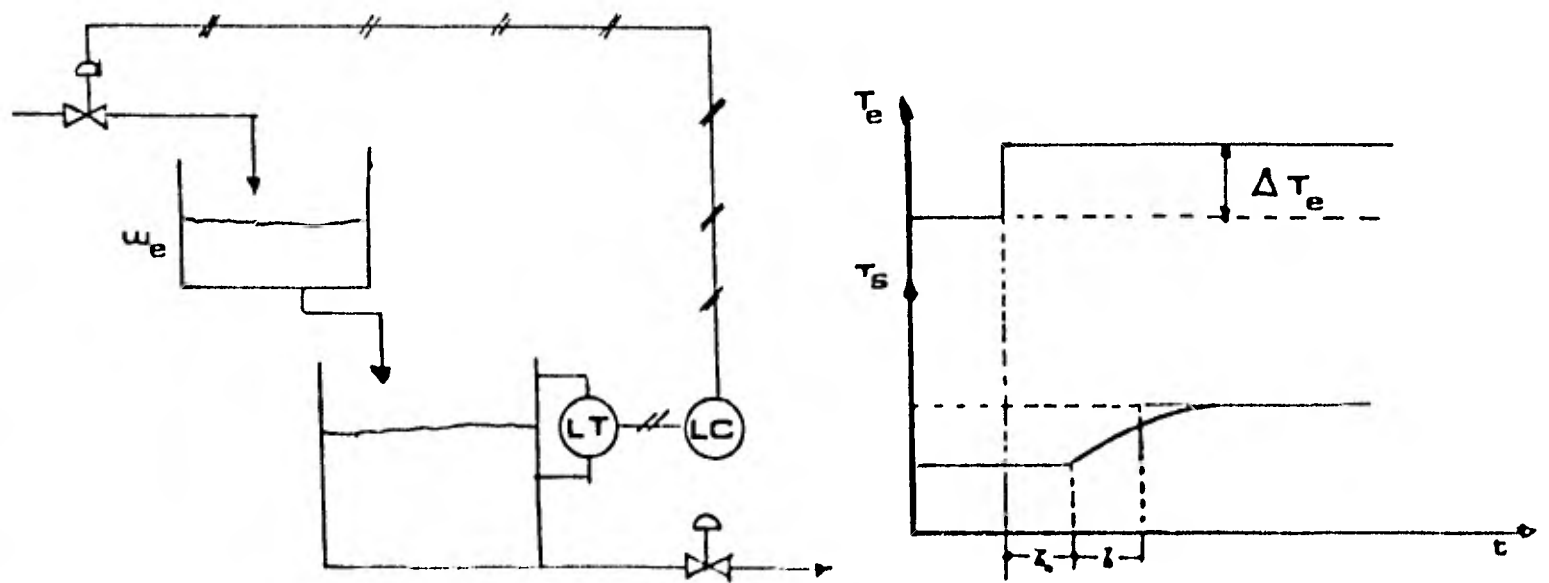


Figura 3.18 Curvas de respuesta para un proceso de dos capacitancias y tiempo muerto.

A continuación se presenta el ejemplo del intercambiador de calor de la figura 3.19.

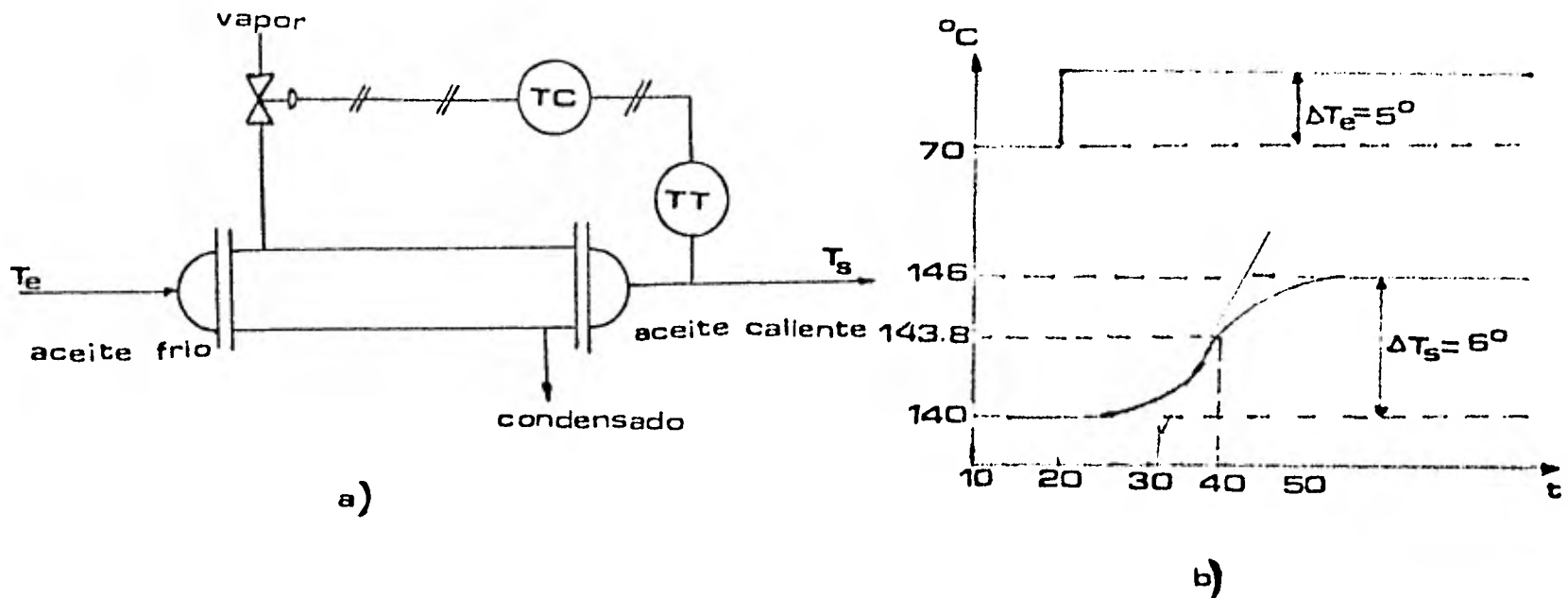


Figura 3.19 Intercambiador de calor a) Proceso b) Curva de respuesta.

Se desea conocer como se comporta la temperatura del aceite de salida cuando cambia la temperatura del aceite de entrada. A fin de conocer la función de transferencia, se empleará la prueba de entrada escalón.

- 1.- Se pone el controlador de temperatura en modo manual.
- 2.- De alguna manera se cambia la temperatura del aceite a la entrada (cambio escalón).
- 3.- Se registran las temperaturas del aceite a la entrada y a la salida y se registran como aparece en la figura 3.19 b).

La curva de respuesta nos indica que tenemos un proceso de capacitancia múltiple, sin embargo, describiremos este proceso mediante uno de una sola capacitancia y tiempo muerto, lo cual es suficiente para aplicaciones prácticas:

así

$$K = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} = \frac{6^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}} = 1.2$$

$$0.632 \quad (6) = 3.792 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s(\tau) = 140 + 3.8 = 143.8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

de la curva de respuesta el valor de T_s ocurre cuando $t = 40$

$$\tau = 37 - 30 = 7.0 \text{ seg}$$

para el tiempo muerto

$$\tau_o = 30 - 20 = 10 \text{ seg.}$$

y la función de transferencia es:

$$\frac{T_s(s)}{T_e(s)} = \frac{1.2 e^{-10 s}}{7 s + 1}$$

En esta sección no se incluyeron las técnicas de modelado de respuesta en Frecuencia. Aún cuando se han usado en reactores, intercambiadores de calor y columnas de destilación se puede decir que esta técnica tiene las desventajas siguientes:

Desarrollar las pruebas toma demasiado tiempo.

El método supone que el proceso es lineal e invariante.

Por ello la principal aplicación de este método, es en los dispositivos lineales muy rápidos como los instrumentos, controladores, amplificadores, etc.

Por otra parte es recomendable reducir al mínimo las pruebas a la planta y para ello, debe usarse la información y el conocimiento del proceso disponible. El volumen de los tanques de almacenamiento, las velocidades o flujos siempre son conocidos y a partir de ellos podemos calcular las constantes de tiempo. La longitud y diámetro de las tuberías pueden servir para localizar elementos con tiempo muerto. Así que combi-

nando los datos disponibles y el conocimiento del proceso, las pruebas deben limitarse a los elementos que completan el balance del proceso.

3.7 Técnicas para la determinación del modelo de proceso mediante su curva de respuesta a una entrada escalón.

En esta sección se tratarán algunas de las técnicas más sencillas para modelar procesos. Los parámetros del modelo se determinan a partir de la respuesta escalón en malla abierta del proceso y mediante cálculos simples y/o técnicas gráficas.

Para plantear el modelo deben considerarse 2 casos:

1) Procesos autoregulables (por ejemplo un sistema térmico). Buscan un nuevo nivel y su dinámica se describe por una o más constantes de tiempo.

2) Procesos no autoregulables (por ejemplo una malla de flujo en un tanque). No buscan un nuevo nivel, sino que crecen o decrecen indefinidamente y su dinámica debe contener al menos un término integral y quizá una o más constantes de tiempo.

La figura 3.20 muestra la respuesta de un sistema no auto regulable descrito por el modelo $G(s)$ con muy buena aproximación.

$$G(s) = \frac{1.2}{s(s+1)(s+2)}$$

El sistema puede aproximarse con un modelo de primer orden $G_m(s)$ el cual no sigue al proceso, solo en inicio del cambio escalón, pero lo hace para tiempos mayores $t > \tau_0$.

$$G_m(s) = \frac{K e^{-\tau_0 s}}{s}$$

Los valores de K y τ_0 se determinan como se muestra -

en la misma Figura 3.20 en la cual también se define el significado de los parámetros.

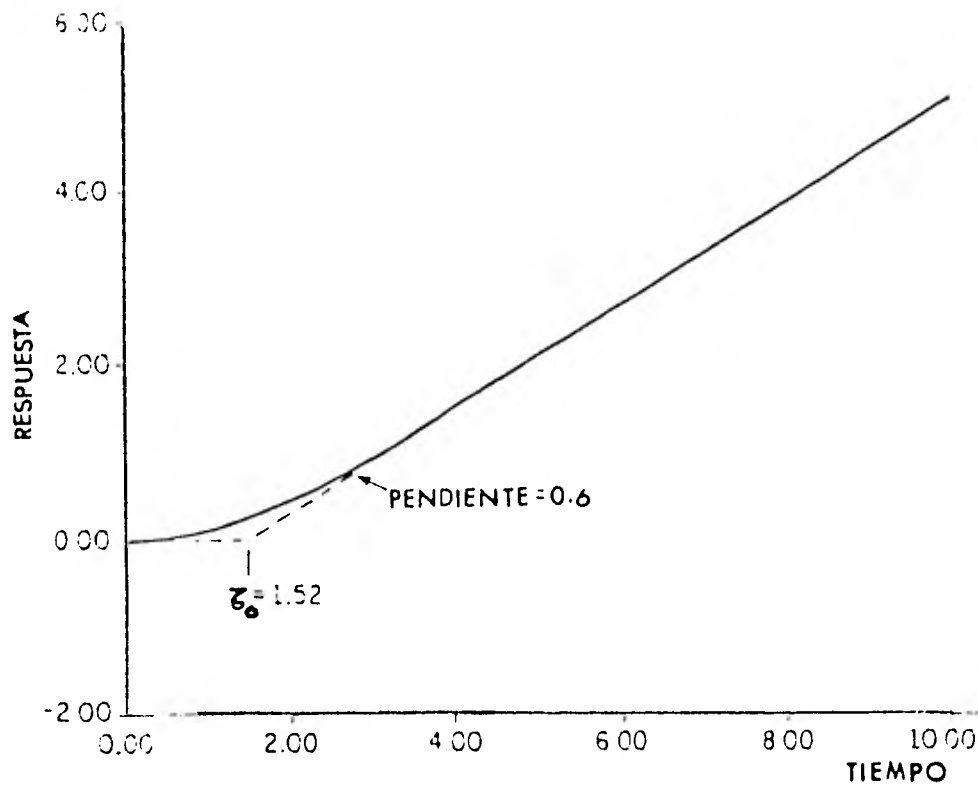


Figura 3.20 Respuesta a una entrada escalón de un sistema no-autoregulable.

El modelo más simple para sistemas autoregulables tiene una constante de tiempo τ y un tiempo muerto asociado τ_0 (incluye la posibilidad de que τ_0 valga cero), y el modelo $G_m(s)$ se escribe así:

$$G_m = \frac{K e^{-\tau_0 s}}{\tau s + 1}$$

donde K es la ganancia del proceso.

El siguiente modelo en complejidad es el que utiliza dos constantes de tiempo τ_1 , τ_2 y tiempo muerto τ_0 .

$$G_m(s) = \frac{K e^{-\tau_0 s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

Podemos emplear otra forma para el modelo de segundo orden con tiempo muerto, en este caso se requiere de los parámetros ω_n frecuencia natural y ξ coeficiente de amortiguamiento. El modelo queda:

$$G_m(s) = \frac{K e^{-\tau_0 s}}{\frac{s}{\omega_n} + 2 \xi \frac{s}{\omega_n} + 1}$$

Para la determinación de los parámetros del modelo de primer orden de sistemas auto-regulables, existen tres alternativas:

- 1.- Trazar una tangente en el punto de inflexión de la curva de respuesta y proyectar sobre el eje del tiempo la intersección de la tangente con la recta del valor final Y_f . Lo anterior corresponde a un tiempo t igual al tiempo muerto τ_0 más la constante de tiempo τ_1 . Este método fué propuesto por Ziegler and Nichols . Ver figura 3.21.
- 2.- El tiempo en que la respuesta alcanza el 63.2 % de su valor final es $\tau_0 + \tau_2$. Esta modificación fué sugerida por Miller () y la determinación gráfica también se presenta en la figura 3.21. Generalmente el segundo método brinda una mejor aproximación.
- 3.- El tercer método utiliza la expresión analítica de la respuesta escalón del sistema de primer orden con retraso, la cual puede escribirse como:

$$Y(t) = \Delta y \left| 1 - e^{-(t-\tau_0)/\tau} \right| \quad t > \tau_0$$

El método consiste en calcular $Y(t)$ para dos tiempos diferentes con lo cual se obtienen dos ecuaciones con dos incógnitas. Los dos tiempos se escogen arbitrariamente, pero deben quedar dentro de la parte transitoria. Por ejemplo se evalúa $Y(t)$ para $t_1 = \tau_0 + 1/3 t_2$ analíticamente:

$$Y (\tau_0 + \tau/3) = 0.284 (\Delta Y).$$

$$Y (\tau_0 + \tau) = 0.632 (\Delta Y).$$

Como se ilustra en la figura 3.21 se lee en la curva de respuesta el tiempo t , para el cual la salida alcanza el 28.4 y el 63.2 por ciento del valor final. En este ejemplo -- los valores leídos son $t_1 = 2.88$ seg $t_2 = 4.8$ seg.

A continuación se escriben las dos ecuaciones como:

$$t_1 = \tau_0 + \frac{\tau}{3} = 2.88$$

$$t_2 = \tau_0 + \tau = 4.8$$

De donde se despejan τ_0 y τ así:

$$\tau_0 = 1.92 \text{ seg.}$$

$$\tau = 2.88 \text{ seg.}$$

En cualquiera de los tres casos, la ganancia se determina como la relación del cambio en la salida al cambio en la entrada:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta r}$$

La referencia () presenta la tabla 3-1 para dar una figura de mérito de los tres métodos:

T A B L A 3-1

Método	Parámetro	Tiempo muerto τ_0	constante de tiempo τ	Ganancia K
1		1.46	4.98	1.0
2		1.46	3.34	1.0
3		1.92	2.88	1.0

$\Delta r = 5$

rius) se obtienen 2 soluciones, una para cada constante de tiempo.

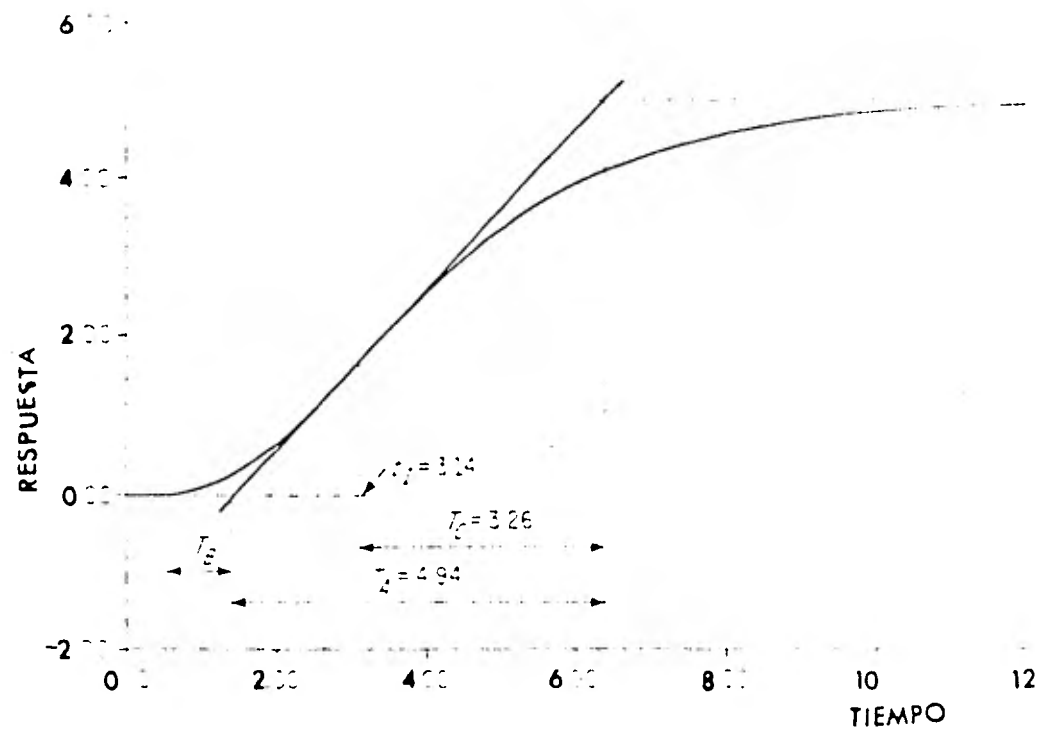


Figura 3.22 Curva de respuesta a una entrada escalón de un sistema sobre-amortiguado.

La figura 3.23 es la solución gráfica de dos ecuaciones, una es la relación entre T_c/T_a y la relación entre las constantes de tiempo τ_1/τ_2 .

$$\frac{T_c}{T_a} = \left(1 + \frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) / (1 - \tau_1/\tau_2).$$

y la otra relaciona la suma de las constantes de tiempo como:

$$\tau_1 + \tau_2 = T_c$$

Las dos ecuaciones se pueden resolver implícitamente para las constantes de tiempo τ_1 y τ_2 .

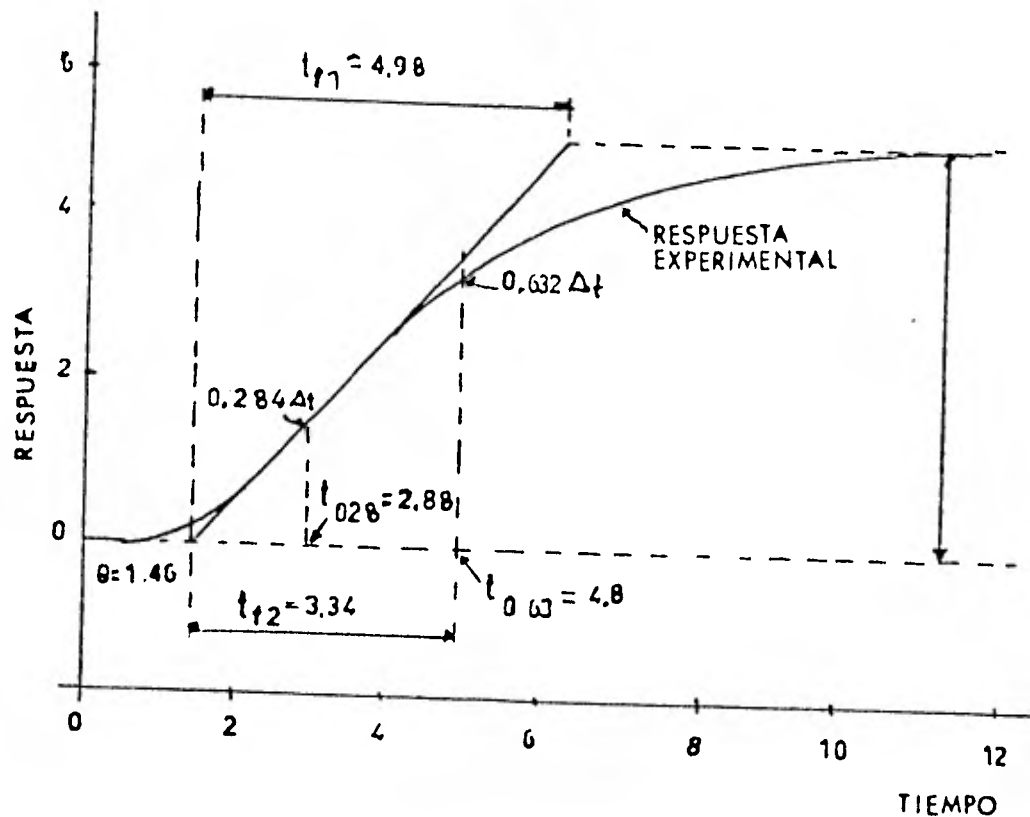


Figura 3.21 Curva de respuesta a entrada escalón de un sistema autoregurable.

Determinación de los parámetros del modelo de segundo orden.-

Esta aproximación es mejor que el modelo de primer orden, pero se tienen que determinar parámetros adicionales lo cual lo hace más difícil de utilizar. Para determinar los parámetros del modelo de segundo orden la referencia () da el procedimiento siguiente:

Se traza la tangente en el punto de inflexión señalando los valores de T_A y T_C como se indica en la figura 3.22. Con la gráfica 3.23 (desarrollada por Sten, Oldenbourg y Sato-

Debido a las gráficas, encontrar esos valores, se reduce notablemente.

Con la gráfica B de la misma figura 3.23 puede obtenerse el tiempo muerto:

$$\tau_o = t_1 + T_C - T_A - T_B$$

donde t_1 es el tiempo que corresponde al punto de inflexión.

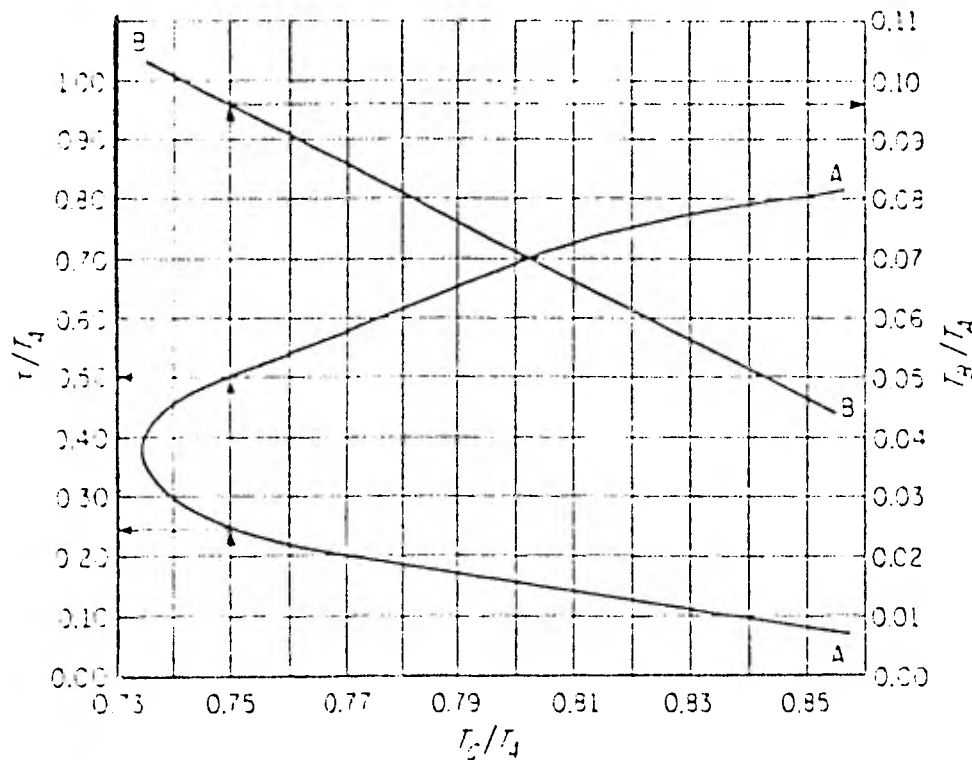


Figura 3.23 Solución gráfica de las ecuaciones para determinar τ_1 y τ_2 .

Smith propuso otro método para calcular el tiempo muerto:

- 1.- Trazar la tangente en el punto de inflexión.
- 2.- Localizar el punto a en la curva de respuesta.
- 3.- Localizar el punto $b = 2.718 a$, justo encima del punto a.
- 4.- Trazar una paralela a la tangente original que pase por el punto b.

5.- La intersección con el eje es el tiempo muerto.

La figura 3.24 muestra la forma de aplicar el método.

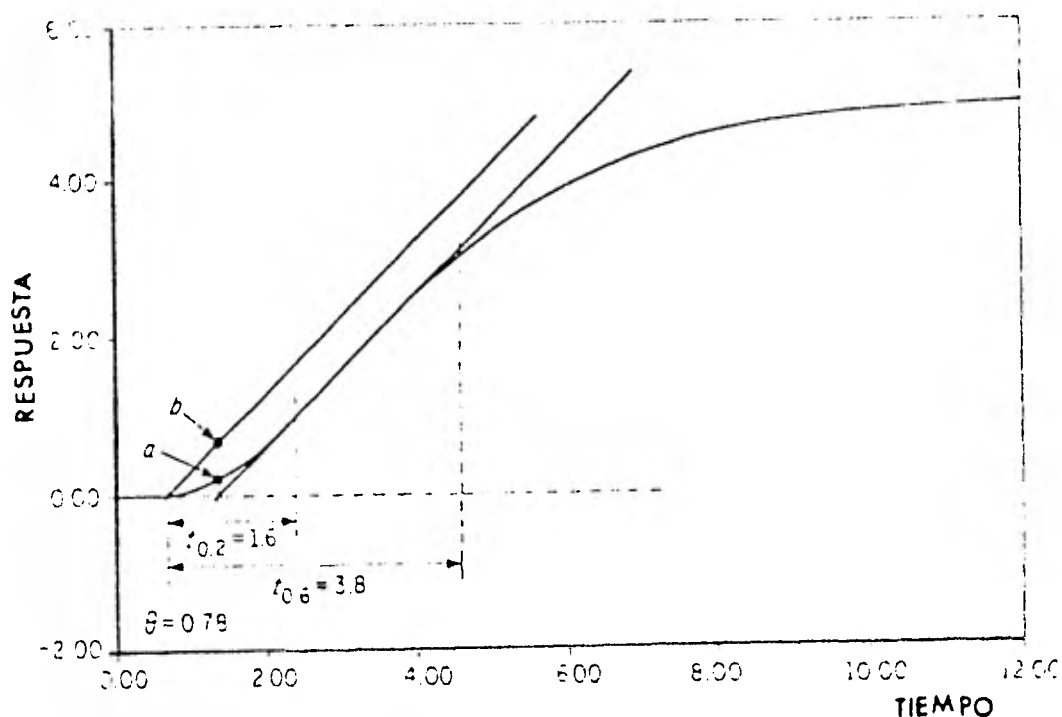


Figura 3.24 Curva de respuesta a una entrada escalón de un sistema sobre amortiguado. Marcas de acuerdo al método de Smith.

Se observa que si T_c/T_A es menor de 0.736 el sistema es sub-amortiguado y no puede trabajarse con la curva de Sten. Cuando es el caso se aplica el método propuesto por Meyer, mediante este método, conociendo el tiempo muerto según el método de Smith, se pueden calcular ξ y ω_n .

El procedimiento es: determinar t_2 y t_6 que son los tiempos transcurridos después del tiempo muerto, donde la respuesta alcanza el 20 y 60% de su valor final y con las gráficas

cas dadas en la figura 3.25 pueden obtenerse los valores de ξ y ω_n . La gráfica de respuesta usada, es la de la figura 3.24 que se usó también para determinar el tiempo muerto con el método de Smith.

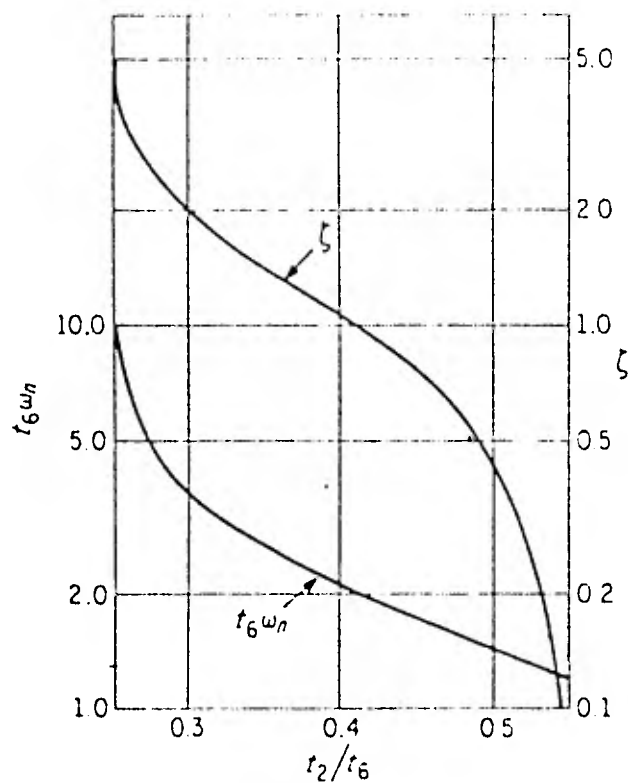


Figura 3.25 Relación de ξ y ω_n con t_2 y t_6 .

El modelo deseado estará dado por:

$$G_m(s) = \frac{K e^{-\tau_0 s}}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi s}{\omega_n} + 1}$$

La calidad de la aproximación es bastante buena.

Hasta aquí se presentaron métodos sencillos para formular modelos de procesos. Para obtener modelos más precisos, existen métodos estadísticos de correlación y regresión, que se utilizan con los datos obtenidos experimentalmente del proceso. La aplicación de éstos métodos requiere gran cantidad de cálculos. La verificación de los datos para que

no se introduzcan datos erróneos y algunas veces pueden faltar datos o algunos de los existentes pueden resultar redundantes. Con los datos disponibles debe obtenerse una correlación adecuada.

CARACTERISTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE LOS CONTROLADORES

Introducción

El diagrama de bloques de una malla típica de control, se presenta en la figura 4.1.

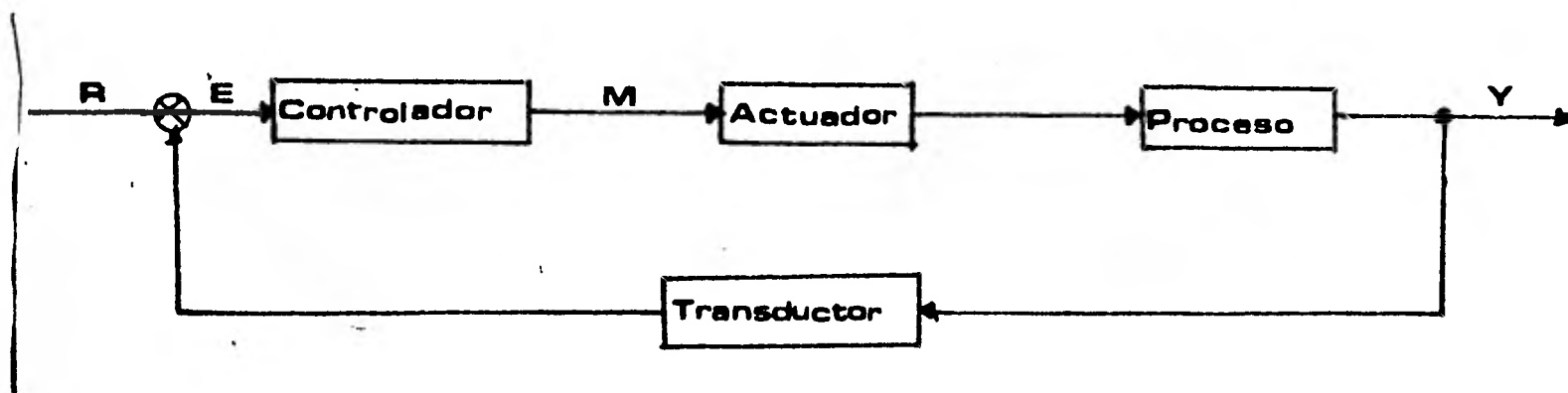


Figura 4.1 Diagrama de Bloques de una Malla de Control Típica.

El controlador es un dispositivo que procesa la señal de error de forma adecuada a las características del proceso y de las necesidades que se pueden tener respecto a la forma de la respuesta de todo el sistema y para lograrlo:

- Compara la señal del proceso - valor medido, (M. V.) - con el valor fijado (S.V.) y
- Envía una señal a la válvula de control o a cualquier otro elemento final de control a fin de mantener la señal de proceso lo más próxima posible al valor fijado.

En esta parte se presenta el significado físico de los parámetros del controlador y más adelante se discutirán las técni

cas para su ajuste. El significado de los parámetros es independiente de que el controlador sea electrónico neumático.

Los modos de operación típicos que puede presentar el controlador, ya se mencionaron y son:

Control de dos posiciones (ON-OFF).

Control proporcional.

Control proporcional, más integral.

Control proporcional, más integral, más derivativo.

4.1 Control de dos posiciones.

En este tipo de controlador la señal "m" que se aplica al actuador puede presentar únicamente dos valores. Este controlador es el más barato, sin embargo, en la práctica puede presentar algunas desventajas tales como el efecto de oscilación de la variable controlada alrededor del "valor fijado" debido a la inercia que presentan en su respuesta los actuadores y el propio proceso. En la figura se muestra un control de nivel que opera con un controlador de dos posiciones. En este ejemplo, la válvula solenoide se abre o se cierra en función del interruptor SW, el cual se conecta cuando el nivel es bajo y se desconecta a un nivel alto.

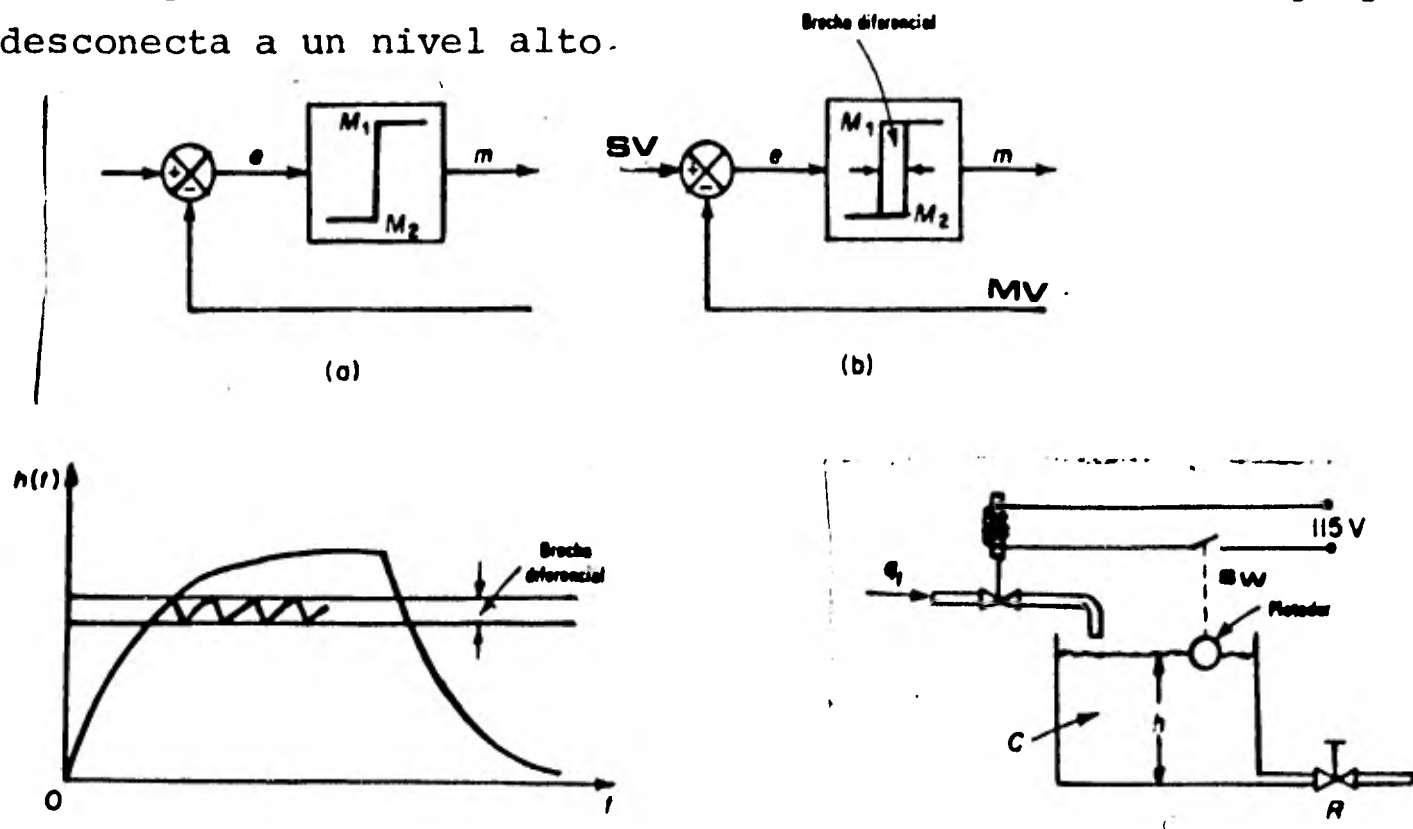


Figura 4.2 Sistema de Control ON-OFF para el nivel del líquido en el Tanque.

Para disminuir la frecuencia de las oscilaciones y evitar el desgaste de la válvula por operación continua, se introduce una zona de histeresis como se muestra en la figura 4.2 b. La brecha diferencial, es la diferencia entre el nivel superior y el nivel inferior.

El valor deseado, (SV) es el punto medio entre el límite inferior L_1 y el límite superior L_2 . Cuando el nivel del tanque disminuye, debido a que el flujo de salida aumenta, al llegar al nivel inferior L_1 el interruptor SW se cierra y la válvula permite el paso de fluido a la entrada, con lo cual el nivel aumenta, y lo hace hasta alcanzar el límite superior L_2 momento en el cual la válvula se desconecta.

El ciclo se repite nuevamente mientras no se modifiquen los ajustes del controlador o la condición del proceso.

4.2 Control proporcional

En este tipo de Controlador la señal "m" es proporcional al error. En la figura 4.3 se ilustra la respuesta de este controlador cuando la señal de error sufre una perturbación de tipo escalón.

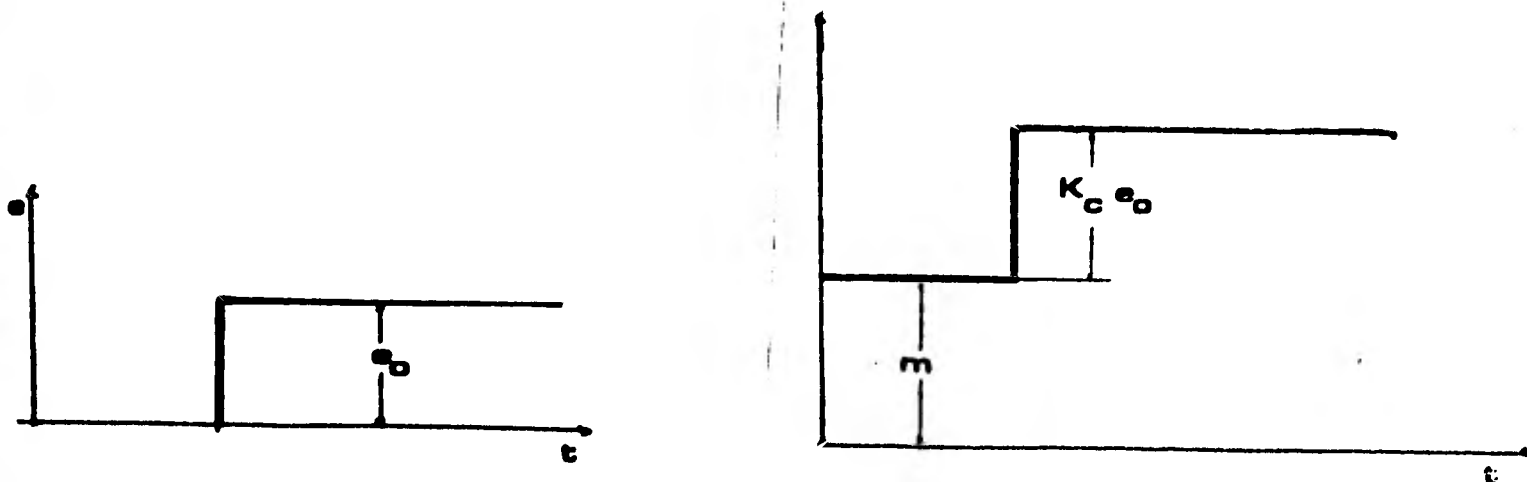


Figura 4.3 Respuesta a entrada escalón de un controlador proporcional a) entrada b) salida.

La ecuación que describe la operación de este controlador es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_C [r(t) - y(t)] = \bar{m} + K_C e(t)$$

donde:

$m(t) \hat{=}$ salida del controlador en (psig) o (m A)

$\bar{m} \hat{=}$ salida del controlador, cuando el error $e(t)$ es cero, necesaria para mantener un punto de operación (psi) o (m A).

$r(t) - y(t) \hat{=}$ señal de error, (psig) o (m A).

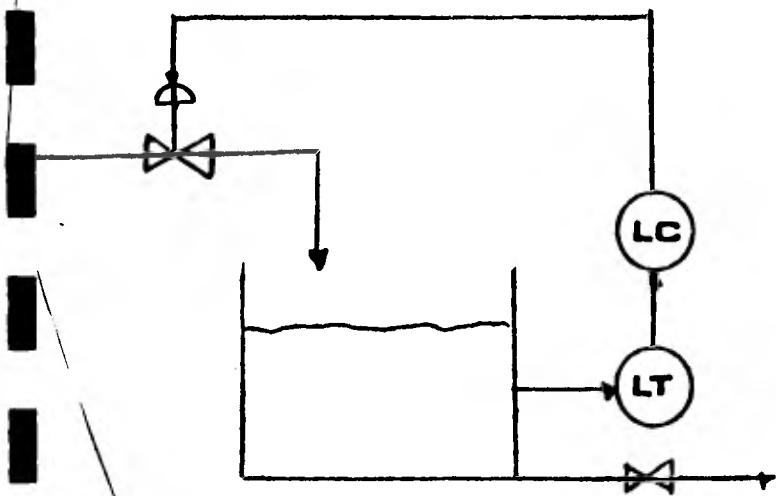
$K_C \hat{=}$ ganancia del controlador, es el parámetro de ajuste del controlador.

En la figura 4.4a se muestra un sistema de control de nivel y en la figura 4.4b su diagrama de bloques, el sistema se regula con un controlador de tipo proporcional. Cabe señalar - que en este tipo de control cuando el proceso no presente ningún efecto de integración en su comportamiento dinámico, el error en estado estable, cuando la entrada es un escalón unitario, tiende a una constante, para el control de nivel mostrado dicho error - sería:

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_C K_2 R}$$

De la ecuación anterior se observa que el error en estado estable disminuye al aumentar K_C , sin embargo, al aumentar K_C la respuesta transitoria presentará efectos indeseables por lo que K_C no podrá aumentarse indefinidamente.

El efecto de aumentar K_C sobre la respuesta del sistema se aprecia gráficamente en la figura 4.5.



a)

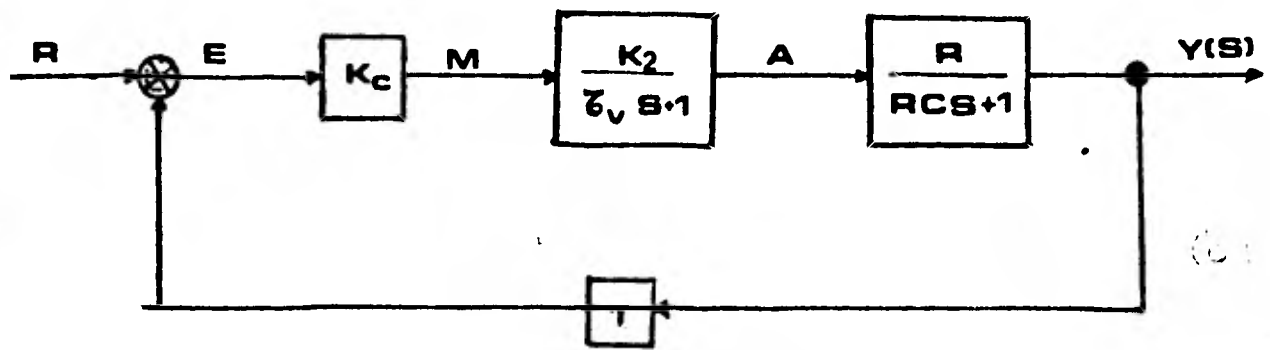


Figura 4.4 Sistema de Control de Nivel con un Controlador Proporcional. a) Representación esquemática b) Diagrama de Bloques.

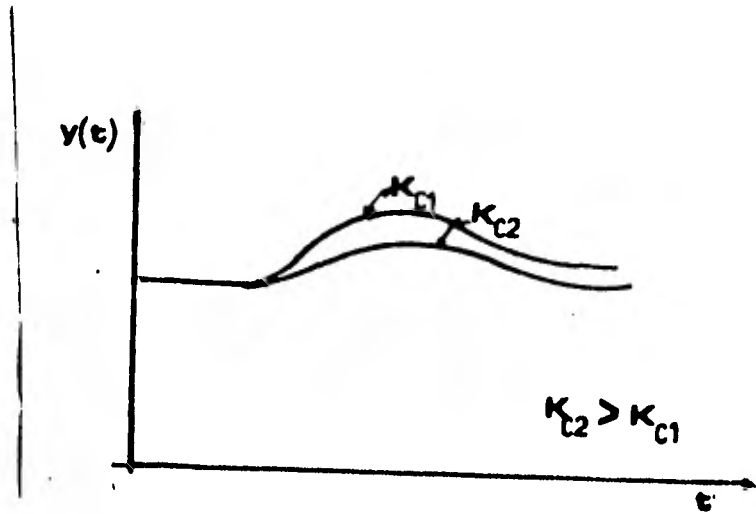


Figura 4.5 Respuesta del Sistema de Control de Nivel al Aumentar el valor de la ganancia K_c .

Varios fabricantes de controladores usan el término

"Banda Proporcional" (P.B.) en lugar del concepto de ganancia (K_c). La ventaja que representa es proporcionar una relación directa entre los ajustes al controlador y su efecto sobre la variable controlada, sin tener en cuenta las unidades de conversión de la ganancia en las etapas intermedias.

La Banda proporcional se define como el rango de la señal de error, a la entrada del controlador, que provoca un cambio del cero al cien por ciento en la salida de este. Este rango se expresa en por ciento del rango de variación de la variable controlada. La relación entre K_c y P.B. es:

$$P B \% = \frac{100}{K_c}$$

esto es:

si K_c aumenta \Rightarrow P. B. angosta (Baja).

si K_c disminuye \Rightarrow P. B. ancha (grande).

La función de transferencia del controlador proporcional es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c$$

Cuando el proceso se puede controlar dentro de una banda de tolerancia, es posible utilizar únicamente el modo proporcional, tal es el caso del control de nivel o el de presión. La referencia No. presenta valores a los cuales se ajusta típicamente la banda proporcional del controlador, según el tipo de variable a controlar.

	flujo	presión	nivel	temperatura
ajuste banda proporcional	100-500%	0-5%	5-50%	10-100%

la referencia 4.2

En el se da un procedimiento para encontrar el valor de ajuste del controlador en función de las características estáticas y dinámicas de cada proceso.

4.3 Control Proporcional más Integral (P.I).

Existen muchos procesos en los que no debe existir diferencia entre el valor fijado y el valor medido, es decir, que éstos sistemas deben funcionar sin error de estado estable, como por ejemplo: reactores químicos, columnas de destilación, etc. Para lograrlo se debe adicionar otro modo de control al controlador proporcional, éste es el modo integral o acción de reajuste.

En el controlador proporcional más integral (PI). Además del término constante \bar{m} , la salida del controlador $m(t)$, se compone de otros dos términos, uno que es proporcional al valor del error y otro que es proporcional a la integral del error, esto es:

$$m(t) = \bar{m} + K_1 e(t) + K_2 \int e(t) dt$$

en la práctica se acostumbra denotar a K_1 como K_c y a K_2 como K_c/T_i en la figura 4-6 se muestra la respuesta de este tipo de controlador a una entrada escalón.

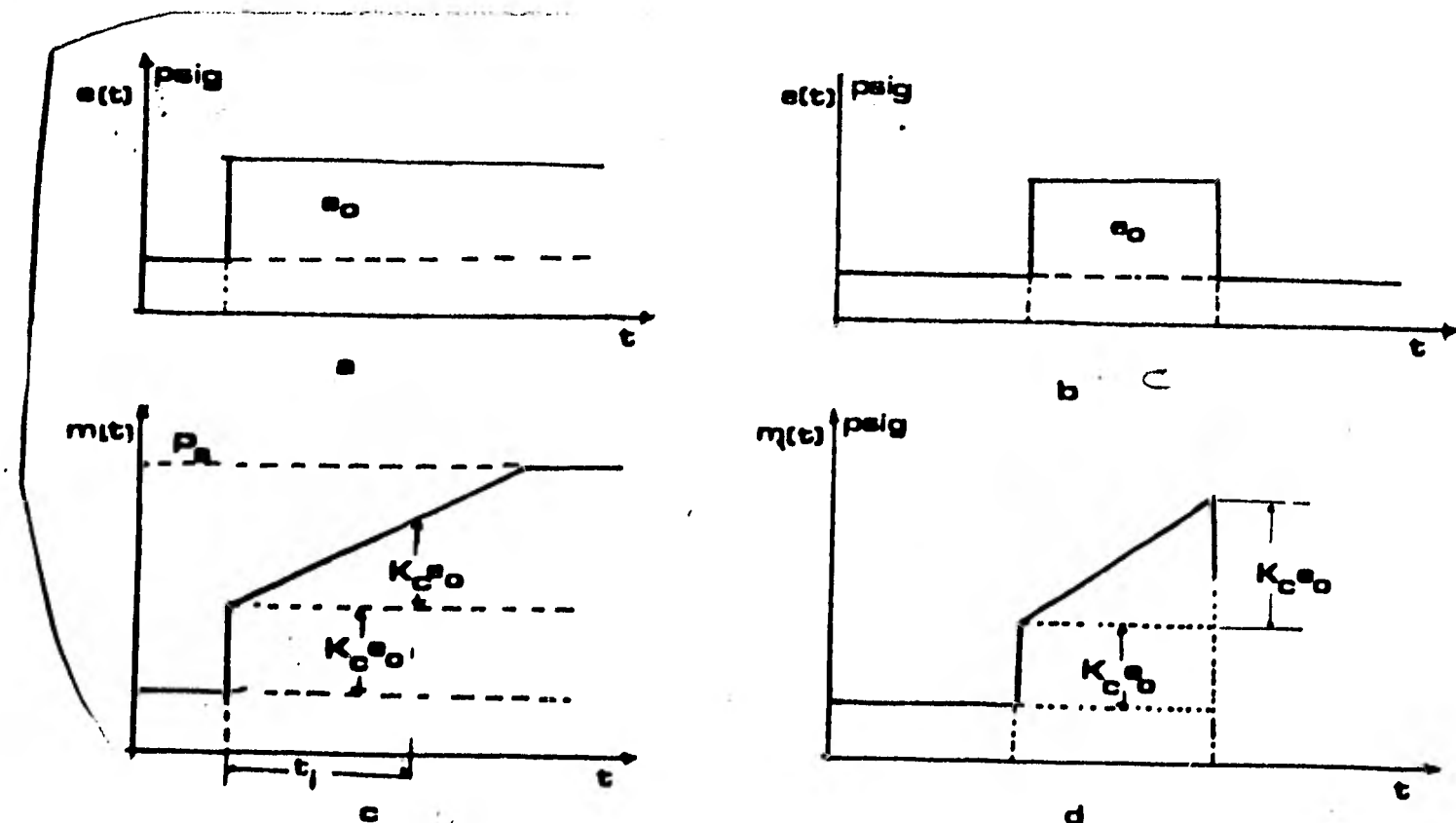


Figura 4.6 a) Entrada tipo escalón. b) respuesta del controlador proporcional mas integral. c) entrada tipo pulso. d) respuesta del controlador a una entrada tipo pulso.

El tiempo de integración T_i significa físicamente el tiempo necesario pero que el controlador repita el valor de $m(t)$ debido a la acción proporcional, por lo cual sus unidades son: [minutos/repetición]. Algunos fabricantes usan el término razón de ajuste T_i^R en unidades de [repeticiones/minuto].

A continuación se da la expresión del controlador P.I. según dos fabricantes:

$$\text{FOXBORO: } m(t) = \bar{m} + \frac{100}{PB} e(t) + \frac{100}{PBT_i} \int e(t) dt$$

$$\text{TAYLOR: } m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c T_i^R \int e(t) dt$$

La sociedad de Instrumentistas de America, recomienda la fórmula que se usó al inicio de este apartado y la función de transferencia asociada es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

El controlador PI agrega un polo en el origen y un cero en $-\frac{1}{T_i}$

En la figura 4.7 se presenta el diagrama de bloques para el sistema de control de nivel de la figura 4.4 a, cuando se utiliza un controlador proporcional mas integral.

Haciendo el análisis de error cuando la entrada es un escalón unitario, el error de estado estable es:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \frac{K_c K_2 R}{RCS + 1}} = 0$$

$$e_{ss} = 0$$

Como se ve la acción integral ajusta nuevamente el error a cero de ahí su nombre de re-ajuste, el término $K_c/T_i \int e(t) dt$ solo valdrá cero cuando $e(t)$ lo sea, por lo cual el controlador continuará modificando su salida mientras el error tenga un valor diferente de cero.

Debido a las características de los sistemas de control de flujo, temperatura y composición, el incluir el modo integral mejora el comportamiento del sistema.

4.4 Control Proporcional más Integral, más Derivativo (P.I.D.)

Algunas ocasiones se adiciona una acción (o modo) derivativo al controlador proporcional más integral. Este modo también se conoce como sobre-corrección momentánea, o acción anticipatoria y su función es anticiparse a las modificaciones del valor medido en función de la razón o velocidad de variación del error.

Los controladores PID se usan principalmente en procesos con constantes de tiempo grandes como controles de temperatura o concentración, a fin de evitar que el error llegue a valores que pongan el producto fuera de especificación por periodos prolongados.

En este tipo de controlador la señal "m" está compuesta de la siguiente forma:

$$m = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d K_c \frac{de(t)}{dt}$$

$T_d \hat{=}$ tiempo derivativo en [min.]

La respuesta al escalón de este controlador se muestra en la figura 4.8.

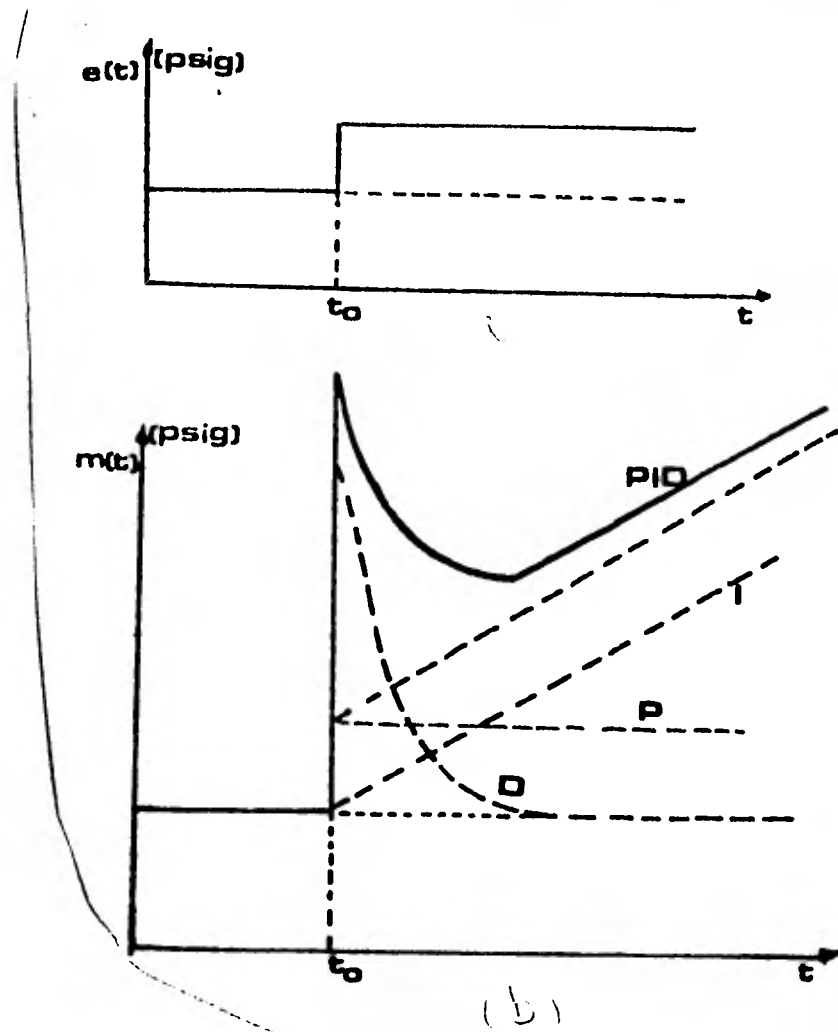


Figura 4.8 Respuesta de entrada escalón de un controlador proporcional integral más derivativo a) entrada b) respuesta.

En este controlador, el error de estado estable también tiende a cero debido a la acción integral y el tiempo en que esto sucede, es menor que en el P y en el P.I. debido al peso de la acción derivativa cuando se presenta el cambio súbito del error, es decir:

$$K_c T_d \frac{d e(t)}{dt}$$

Cuando el error vale cero o una constante el efecto de la acción derivativa es nulo. En los procesos con variaciones rápidas y/o de alta frecuencia, como los sistemas de control de flujo, este modo derivativo es perjudicial pues aumentaría el error.

Los controladores mencionados anteriormente, pueden realizarse físicamente de diversas formas, lo más común es que se realicen mediante una combinación de dispositivos cuya fuente primaria de energía es un gas a presión, usualmente aire, o mediante fuente primaria tipo electrónica.

4.5.1 Controladores Neumáticos.- La primera generación de controladores fue mecánica y la segunda de tipo neumática. Actualmente se siguen empleando los controladores neumáticos dependiendo de las características del proceso y la experiencia del personal de planta. En los controladores neumáticos, la salida y la entrada, se encuentran normalizadas al rango de 4 a 12 psig que corresponde a una variación del cero al cien por ciento. A continuación se describirá el funcionamiento de los elementos básicos que integran un controlador neumático, así como la operación del conjunto

Mecanismos diferenciales (comparadores).- Este mecanismo hace la comparación de dos variables, obteniéndose su salida como un desplazamiento proporcional a la diferencia entre las variables de entrada. Usualmente dichas variables serán el valor fijado y el valor medido de un proceso. En la figura 4.9 se presenta un comparador fuelle-resorte.

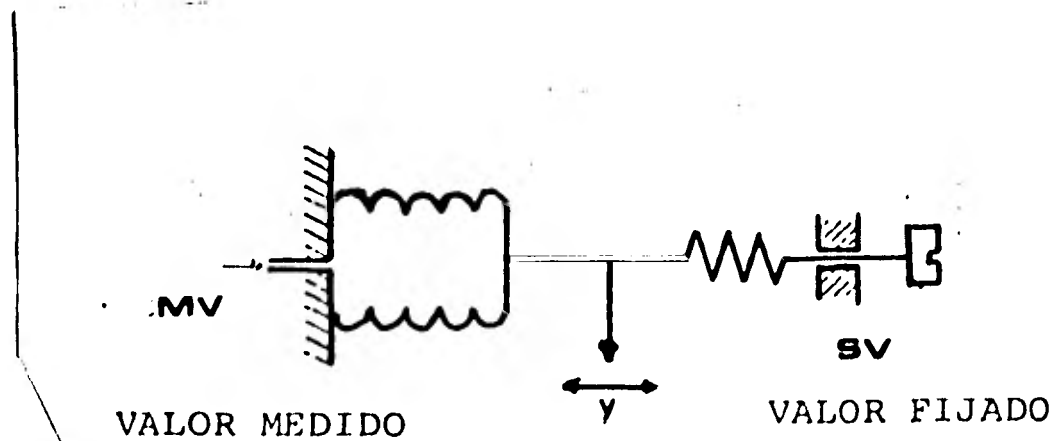


Figura 4.9 Mecanismo Diferencial fuelle-resorte.

En la figura 4.10 se muestra un mecanismo fuelle-fuelle, así como el diagrama de bloques que los representa.

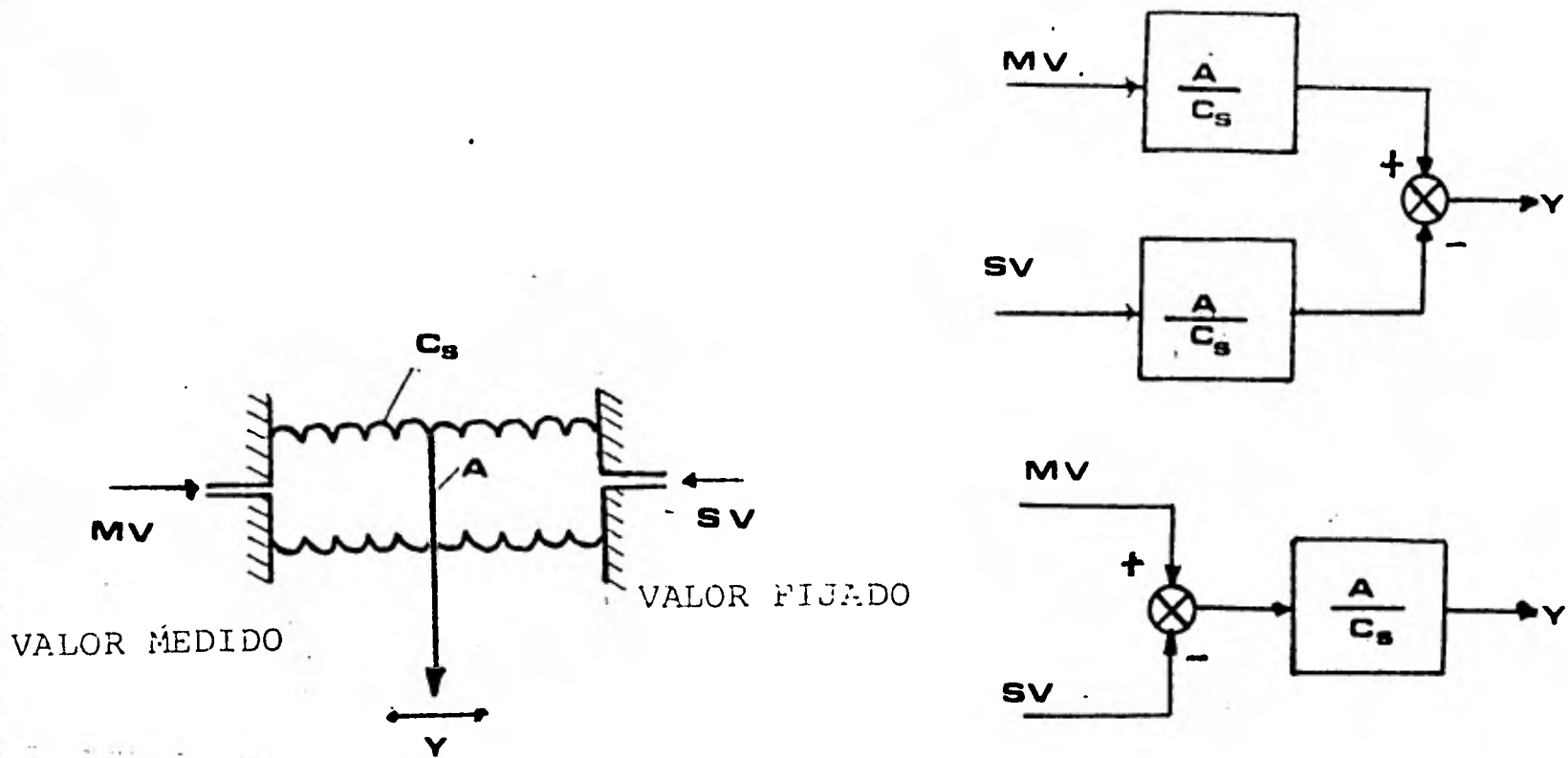


Figura 4.10 a) Mecanismo diferencial fuelle-fuelle. b) Diagrama de Bloques del Sistema.

El $\frac{A}{C_s}$ representa la capacitancia de los fuelles y A el área transversal efectiva de los mismos. Para el mecanismo mostrado en la figura 4.9 la variable medida, debe estar en forma de una presión proporcional a la variable que se requiere controlar, por ejemplo si se requiere controlar una temperatura, la presión de entrada al fuelle de la figura 4.9 debe ser proporcional a la temperatura. El valor fijado en el mecanismo de la figura 4.9 se gradúa variando la compresión en el resorte mediante el tornillo. Para el mecanismo mostrado en la figura 4.10 el principio de funcionamiento es similar solo que en este caso los dos valores M.V. y S.V. deben estar en forma de presión.

Transductor de Desplazamiento a Presión (Sistema Tobera-Obturador)- En la figura 4.11 a, se ilustra este mecanismo y su

representación esquemática en la figura 4.11 b y su característica de transferencia en la figura 4.11 c. Nótese que la pendiente de la curva en la figura 4.11 c es relativamente grande.

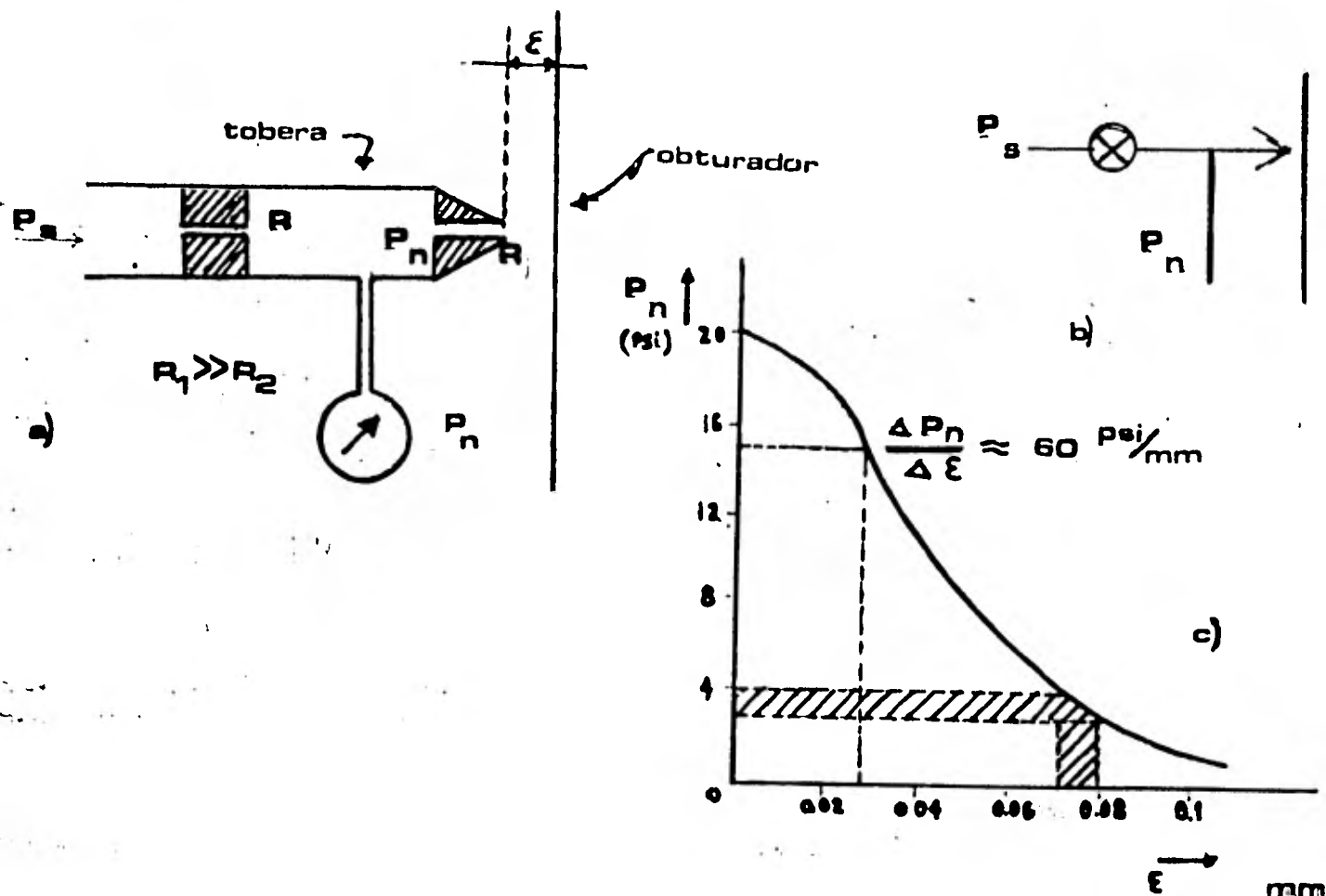


Figura 4.11 a) Sistema tobera-obturador. b) Símbolo. c) Característica de transferencia.

Se suministra aire a una presión P_s a la tobera a través de una restricción fija R_1 de valor menor que el de la tobera R_2 , por lo cual permite que escape el flujo de aire. Si la separación ϵ del obturador disminuye aumenta la restricción R_2 y también aumenta la presión del manómetro P_n . El sistema mostrado en la figura tiene una sensibilidad de 60 psi/mm.

Amplificador de Presión (Relevador)..- En muchas ocasiones se requiere una amplificación para una cierta presión, en la figura 4.12 se muestra un mecanismo que realiza la acción mencionada, así como también su representación esquemática.

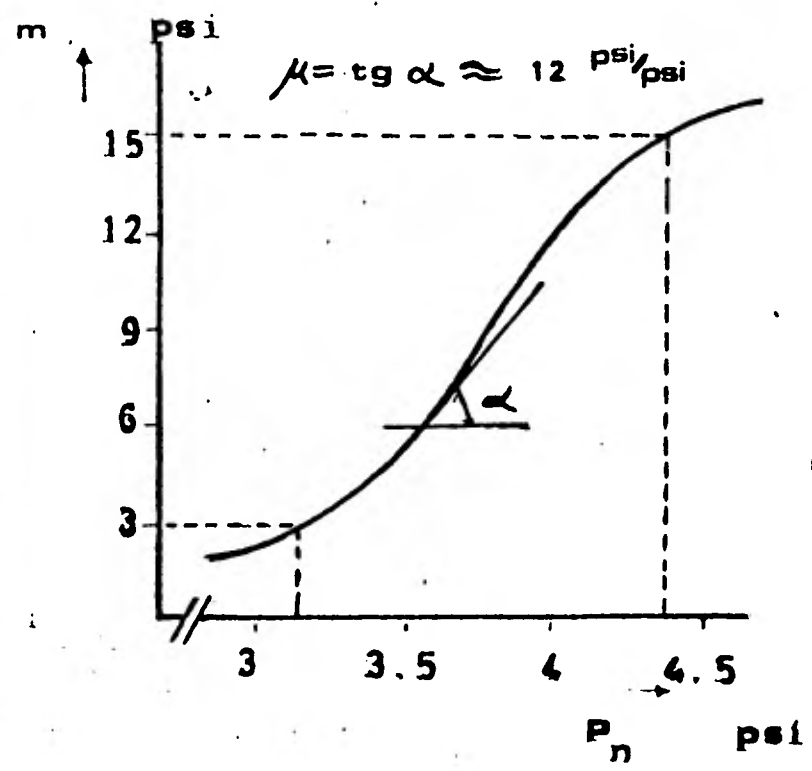
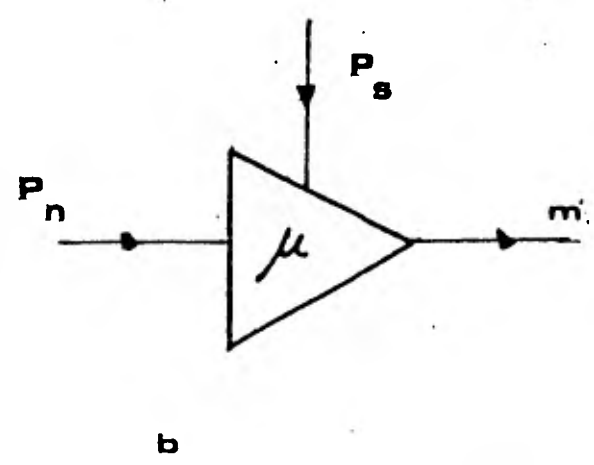
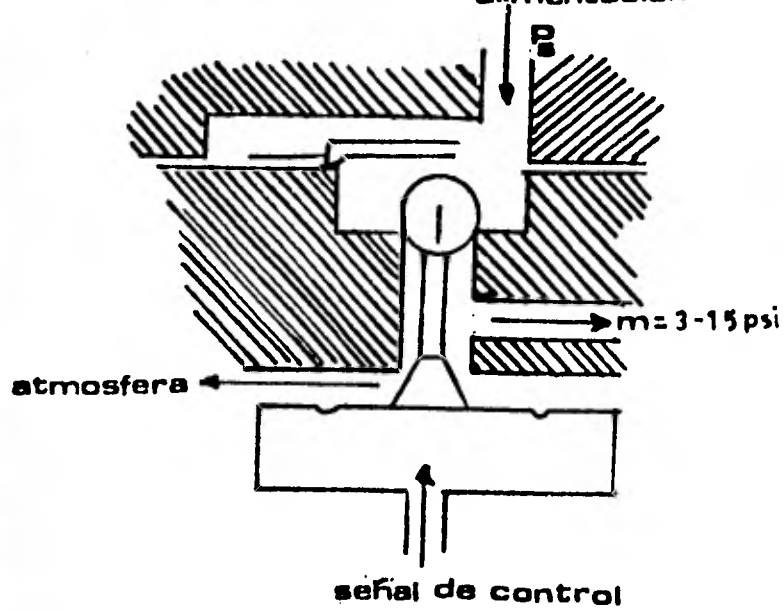


Figura 4.12 a) Amplificador Neumático b) Símbolo. c) Característica de Transferencia.

Este relevador actúa como amplificador de segunda - etapa ya que puede controlar grandes caudales de aire en función de la presión de la tobera. A medida que aumenta la presión P_n el diafragma es empujado hacia arriba, por lo tanto la bala se mueve de su asiento y mayor cantidad de aire va a la válvula de control. La sensibilidad para el relevador mostrado es de 12 $[\text{psi/psi}]$.

Controlador Proporcional. (Neumático). - En la figura 4.13 se muestra una representación esquemática de este tipo

de controlador y su diagrama de bloques, a partir de los elementos descritos anteriormente.

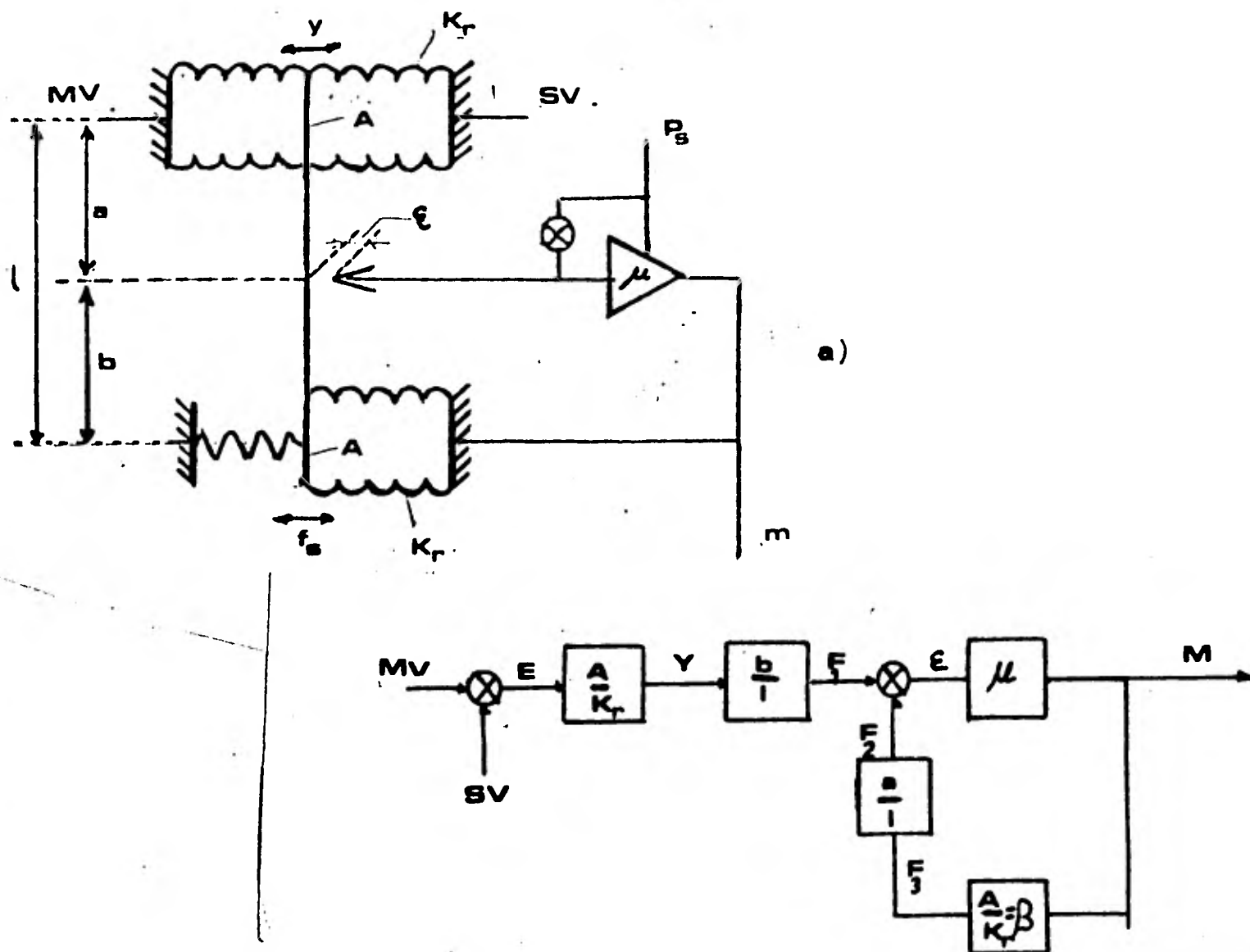


Figura 4.13 a) Esquema de funcionamiento de un controlador neumático proporcional b) Diagrama de Bloques.

Del diagrama de bloques mostrado en la figura 4.13 b) y tomando en cuenta que μ es muy grande, la función de transferencia del controlador es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{b}{a} = K_c$$

De lo anterior se observa que variando las longitudes "a" y "b" se pueden lograr distintas ganancias para este tipo de controlador.

Controlador Proporcional más Integral Neumático.- En la figura 4.14 se presenta una representación esquemática de un

controlador proporcional más integral (neumático), así como su diagrama de bloques.

$$R_i \text{ totalmente cerrada} \Rightarrow m = K_1 e$$

$$R_i \text{ totalmente abierta} \Rightarrow K_C = \frac{m}{e} = \mu \text{ (malla abierta)}$$

$$R_i \text{ abierta parcialmente} = m = \bar{m} + K_C e + \frac{K_C}{T_i} \int e dt$$

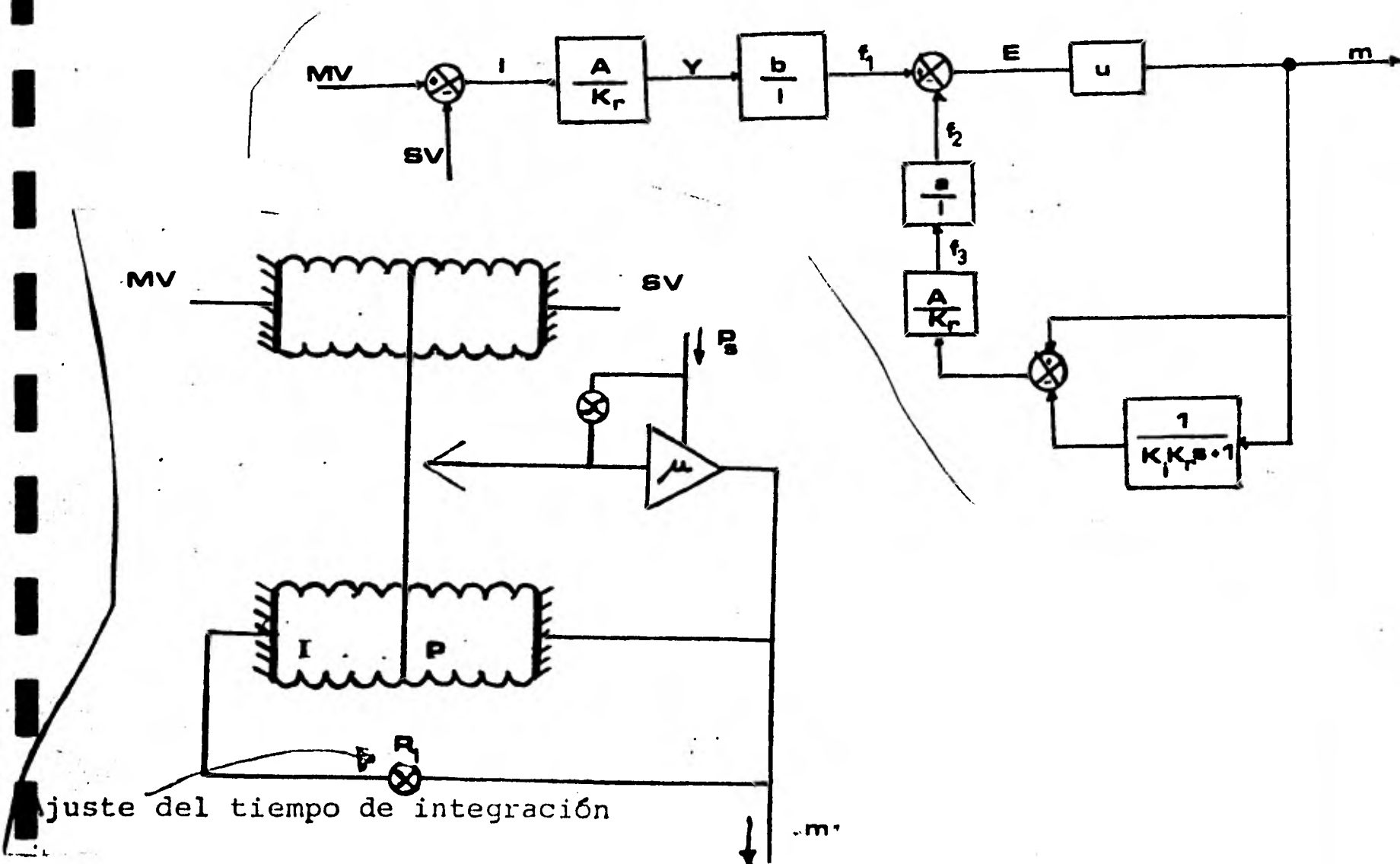


Figura 4.14 a) Esquema de funcionamiento de un controlador neumático P.I. b) Diagrama de Bloques.

Controlador proporcional más integral, más derivativo, Neumático. - En la figura 4.15 se muestra un controlador PID, así como también su diagrama de bloques. Debido a que en la práctica la variable μ es muy grande (pendiente de la característica presión desplazamiento, en el transductor de desplazamiento a presión).

Se tendrá que:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

donde:

$$K_c = \frac{b}{a} \frac{C_s}{A}$$

$$T_d = R_d C$$

$$T_i = R_i C$$

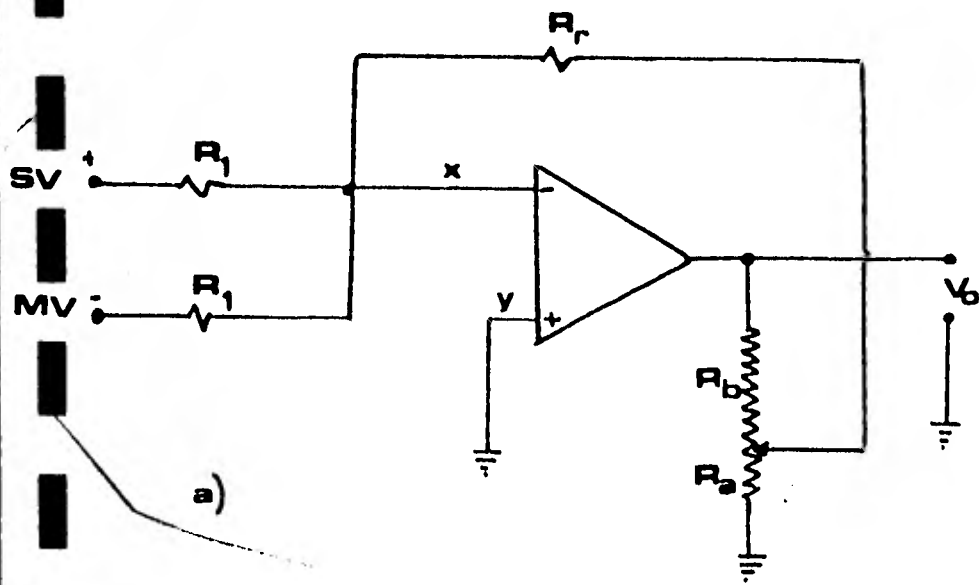
siendo C la capacitancia neumática de los fuelles.

Nótese que otras dos acciones de control se pueden lograr para valores particulares de las resistencias neumáticas R_i y R_d . Por ejemplo si $R_i \rightarrow \infty$ se obtendría un controlador tipo PD o bien si $R_d \rightarrow 0$ se obtendría un controlador del tipo P. I.

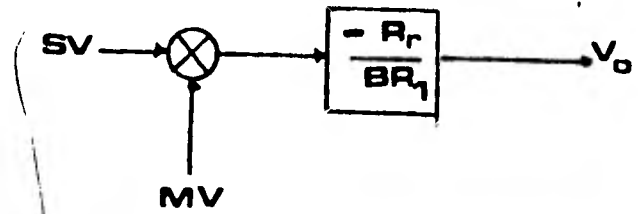
4.5.2 Controladores Electrónicos.- La mayoría de los controladores P, PI ó PID utilizados actualmente en la industria, están hechos mediante amplificadores operacionales y elementos resistivos capacitivos o inductivos.

Los rangos de entrada y salida, normalmente son los siguientes 1 a 5 mA., 4 a 20 mA, y 1 a 5V. Se requiere de un transductor, como los presentados en el capítulo II para traducir la medición física (presión, temperatura, etc.) en una señal que varía en uno de los rangos arriba mencionados. Además si el actuador es una válvula de control neumática se requiere de un convertidor que cambie la señal electrónica en otra señal neumática equivalente.

Controlador proporcional Electrónico.- En la figura 4.16 se presenta el diagrama de conexiones para este controlador, así como su diagrama de bloques.



a)



b)

Figura 4.16 a) Diagrama Electrónico del Controlador Proporcional
b) Diagrama de Bloques.

Como se puede ver, la conexión de realimentación se toma de un potenciómetro R_p en lugar de hacerlo directamente de la salida, con objeto de modificar la ganancia K_c , se define el factor β como:

$$\beta = \frac{R_a}{R_a + R_b} \quad \text{por lo cual } V_p = \beta V_o$$

la ecuación de corriente para el nodo x es:

$$i_s - i_m + i_r - i_o = 0$$

debido a la alta impedancia de entrada del amplificador $i_o = 0$ y además $V_x = V_y = 0$ tomando en cuenta lo anterior y sustituyendo, la ecuación de corriente es:

$$\frac{1}{R_1} (SV - MV) = - \frac{\beta V_o}{R_r} \quad \text{de donde:}$$

$$V_o = - \frac{R_r}{\beta R_1} (SV - MV)$$

en Laplace:

$$\frac{V_o}{SV-MV}(s) = - \frac{R_r}{\beta R_1} < = > \frac{M(s)}{E(s)} = K_c$$

por comparación se puede ver que la ganancia se ajusta variando β :

$$K_c = \frac{R_r}{\beta R_1}$$

$$0 \leq \beta \leq 1$$

Existen otras configuraciones que tienen un desempeño análogo, sin embargo, no se discutirán aquí.

Controlador Proporcional más Integral Electrónico.- El diagrama se presenta en la figura 4.17 a). En este circuito se tiene un potenciómetro R_p para modificar la ganancia y otro potenciómetro R_2 para modificar el tiempo de integración T_i , el análisis es similar al caso del controlador proporcional, en este circuito debe cumplirse que $R_2 \ll R_p$ a fin de lograr que $i_p=0$.

Nuevamente considerando la suma de corrientes para el nodo x:

$$i_s - i_m + i_r - i_o = 0$$

por otro lado, a la salida del amplificador se cumple que:

$$V_o = V_c + V$$

$$V_o = \frac{1}{c} \int i dt + R_2 i$$

$$V_o = \frac{1}{R_2 C_2} \int V_{R2} dt + V_{R2}$$

$$i_r = \frac{\beta V_{R2}}{R_r}$$

en Laplace:

$$V_o(s) = \frac{V_{R2}(s)}{R_2 C s} + V_{R2}(s) \quad y$$

$$I_R(s) = \frac{\beta V_{R2}(s)}{R_r}$$

sustituyendo en la ecuación de corriente:

$$\frac{1}{R_1} (SV - MV) + \frac{\beta R_2 C s}{R_r (R_2 C s + 1)} V_o = 0$$

$$\frac{V_o}{(SV - MV)} = - \frac{R_r (R_2 C s + 1)}{\beta R_1 R_2 C s}$$

factorizando

$$\frac{R_r}{\beta R_1}$$

$$\frac{V_o}{(SV - MV)} (s) = - \frac{R_r}{\beta R_1} \left[1 + \frac{1}{R_2 C s} \right] = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

por comparación, se observa que:

$$K_c = \frac{R_r}{\beta R_1} \quad y \quad T_i = R_2 C$$

Controlador Proporcional integral más Derivativo Electrónico.- El funcionamiento de este circuito es similar a los dos anteriores en cuanto a la acción proporcional y la integral. La acción derivativa se consigue mediante la resistencia R_2 y el capacitor C_2 . El diagrama de conexiones es el de la figura 4.18.

Para el funcionamiento de este circuito es necesario que $R_p \gg R_3 \gg R_2$. Con lo cual la función de transferencia $\frac{V_{R3}}{V_o}$ es:

$$\frac{V_{R3}}{V_o} = \frac{R_3 C_1 s}{1 + (R_3 C_1 + R_2 C_2) s + R_3 R_2 C_1 C_2 s^2}$$

también se cumple que:

$$V_R = \beta V_{R3}$$

$$V_R = \beta_{R3} \delta$$

$$V_R = \beta V_{R3}$$

así que:

$$\frac{V_o}{V_R} = \frac{V_{R3}}{V_R} \cdot \frac{V_o}{V_{R3}}$$

$$\frac{V_o}{V_r} = \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{R_2 C_2}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_3 C_1 S} + R_2 C_2 S \right)$$

como $R_3 \gg R$ implica $\frac{R_2 C_2}{R_3 C_3} \approx 0$

$$\frac{V_o}{V_R} = \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{1}{R_3 C_1 S} + R_2 C_2 S \right)$$

Estableciendo la ecuación de corrientes para el nodo x:

$$\frac{1}{R_1} (SV - MV) = - \frac{V_R}{R_r}$$

sustituyendo V_R de la expresión anterior la función de transferencia total queda:

$$\frac{V_o}{SV - MV} = - \frac{R_r}{\beta R_1} \left(1 + \frac{1}{R_3 C_1 S} + R_2 C_2 S \right)$$

por comparación con la función de transferencia del apartado 4.

$$\frac{V_o}{SV - MV} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right)$$

se deduce que:

$$K_c = \frac{R_r}{\beta R_1}, T_i = R_3 C_1, T_d = R_2 C_2.$$

Transmisores de Señal. - En el capítulo II se mencionaron los principales métodos para la medición de las variables industriales. Todos los sensores se conectan a transmisores

res a fin de poder enviar la información hasta el cuarto de control y/o para conectar diferentes instrumentos a una misma señal. La salida de los transmisores neumáticos está normalizada al rango de 3 a 15 psig y la de los transmisores electrónicos al rango de 4 a 20 mA.

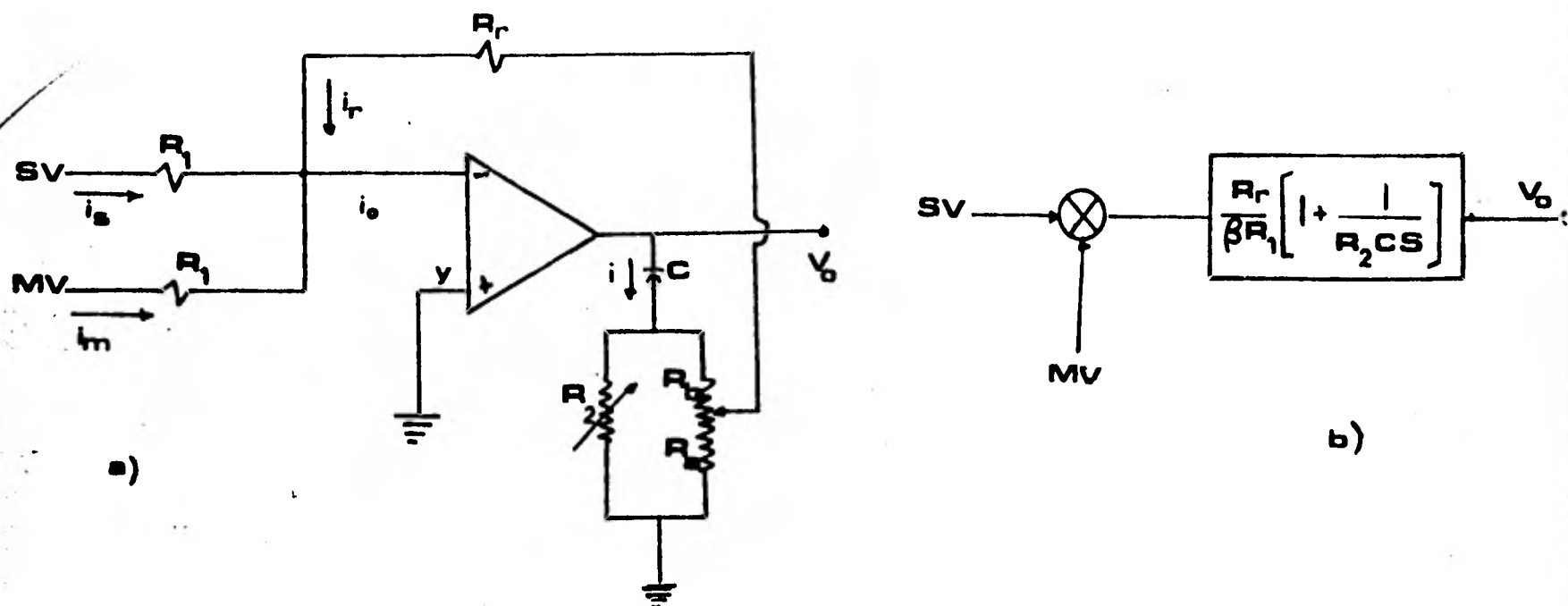


Figura 4.17 a) Diagrama Electrónico de Controlador Proporcional más Integral b) Diagrama de Bloques.

Dependiendo de la variable primaria, algunos transmisores pueden ser rápidos, por ejemplo los transmisores de flujo y otros pueden considerarse lentos, por ejemplo los transmisores de ph o temperatura. En el primer caso se asume una respuesta instantánea y en el segundo se debe tomar en cuenta el efecto de la dinámica del transmisor sobre la estabilidad de la malla.

La ganancia de los transmisores, se determina de los rangos de operación del instrumento. Por ejemplo la ganancia de un transmisor de presión tipo neumático en el rango de entrada - de 0-250 psig se determinará así:

$$K = \frac{\text{salida}}{\text{entrada}} = \frac{15-3}{250-3} = 0.048 \quad \text{psig/psig}$$

si el transmisor fuese electrónico

$$k = \frac{\text{salida}}{\text{entrada}} = \frac{20-4}{250-0} = \frac{16}{250} = 0.64 \text{ mA/psig.}$$

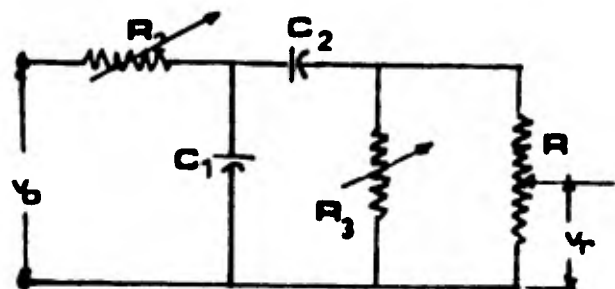
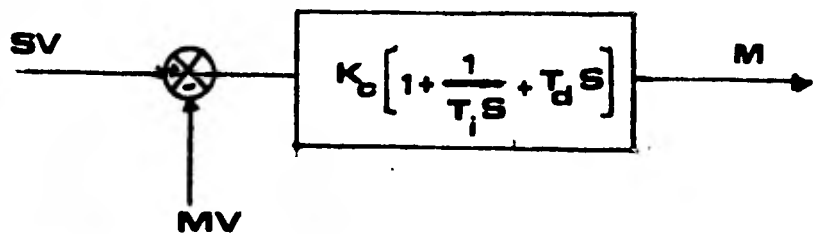
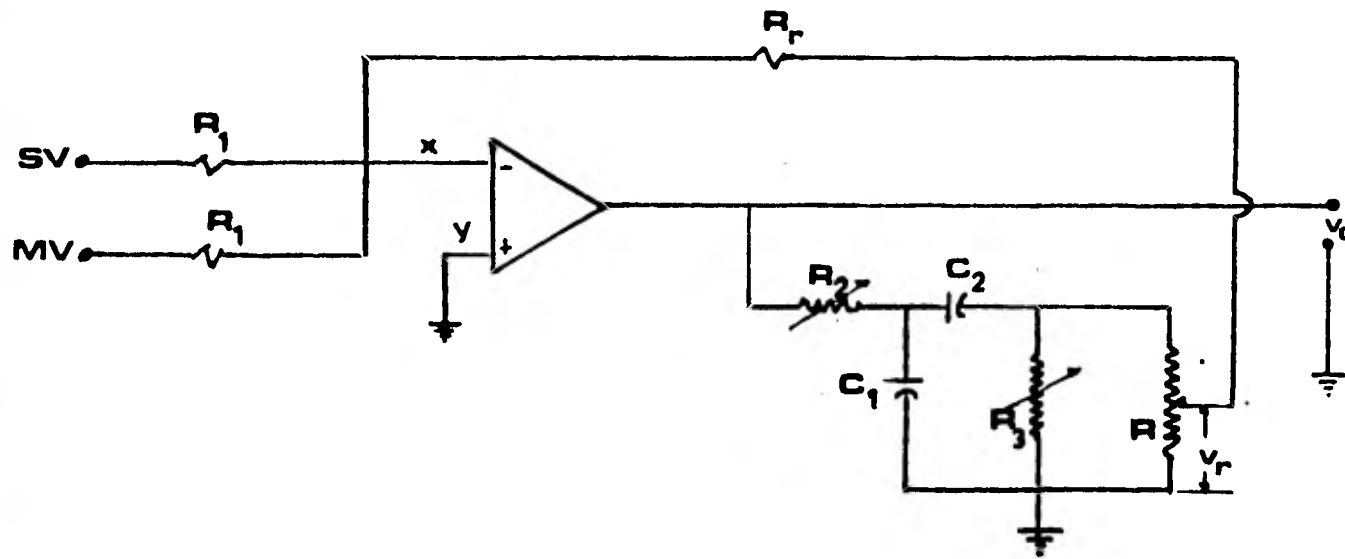


Figura 4.18 a) Diagrama Electrónico del Controlador Proporcional, Integral, más derivativo b) Diágrama de Bloques. c) Red de realimentación.

Los transmisores de ph, concentración y temperatura, es necesario representarlos como sistemas de una capacitancia.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

La constante de tiempo normalmente lo proporciona el fabricante, o puede determinarse de la prueba a escalón.

Línea de transmisión.- En las instalaciones neumáticas se presentan retrasos de tiempo por transporte y la descripción matemática es: $e^{-\tau.S}$

el valor del tiempo muerto depende de la distancia entre el punto de medición y el lugar donde se procesa la información, por ejemplo para una distancia de 200 m y diámetro exterior del tubo de 1/4, se puede presentar un tiempo muerto entre 4 y 6 segundos. El tiempo muerto hace difícil el control del proceso, por lo cual debe eliminarse instalando localmente el controlador o utilizando instrumentación electrónica.

Convertidores del Señal.- Estos elementos se usan para interconectar dispositivos con flujo de trabajo diferente, las más comunes son:

	entrada	salida
Corriente a presión	4 a 20 mA	3-15 psig
	10 - 50 mA	3-15 psig
presión a corriente	3 - 15 psig	4-20 mA
	3 - 15 psig	10-50 mA
tensión a presión	0 - 10V	3-15 psig
presión a tensión	3 - 15psig	0-10V

la función de transferencia de estos dispositivos es solo una ganancia. Ejemplo:

$$K = \frac{\Delta_{salida}}{\Delta_{entrada}} = \frac{20-4}{15-3} = 1.33 \text{ mA/psig.}$$

4.6 Selección de los modos del controlador

En la teoría de control se diseña un compensador dinámico especial para cada sistema. En el control de procesos, el diseñador escoge un tipo de controlador de los disponibles comercialmente, así como sus ajustes en función de las caracte

SISTEMAS DE CONTROL COMPUESTO

Introducción

Hasta aquí se ha presentado el funcionamiento de los sistemas de control de una sola malla, no obstante se puede necesitar de estrategias de control más elaboradas a fin de operar adecuadamente los procesos.

La creciente utilización de la computadora digital y los microprocesadores, han facilitado la utilización de estrategias que debido a su complejidad y difícil implementación en componentes analógicos no eran utilizados en forma abundante.

En éste capítulo se presentan las estrategias de control consideradas como avanzadas, debido a la complejidad matemática y física de su implementación.

5.1 Sistemas de Control en Cascada

Para ilustrar la necesidad de este tipo de control, analicemos el ejemplo de la figura 3.19, que es el control de temperatura de un intercambiador de calor a base de vapor. La estabilidad en la temperatura de este sistema, depende que - a) el suministro de vapor sea constante, misma que puede variar por la demanda en otros procesos dentro de la misma línea de servicios auxiliares y b) que exista retraso en la medición. Debido a que transcurre algún tiempo para que el sistema de control pueda detectar y compensar los cambios en la variable manipulada vapor, ya que éste tiene que viajar por las resistencias y capacitancias del proceso hasta modificar la variable controlada.

El sistema de control en cascada es un arreglo de dos controladores, maestro-esclavo, en el cual la salida del control

maestro modifica el punto de ajuste del control esclavo, en lugar de modificar el estado de algún elemento final, de control. Por otra parte el control maestro compara el valor real de la variable principal con el valor fijado, mientras que el controlador esclavo compara el valor real de la variable manipulada con el del valor fijado por el controlador maestro. En la figura 5.1 se presenta un sistema de control en cascada así como su diagrama de bloques.

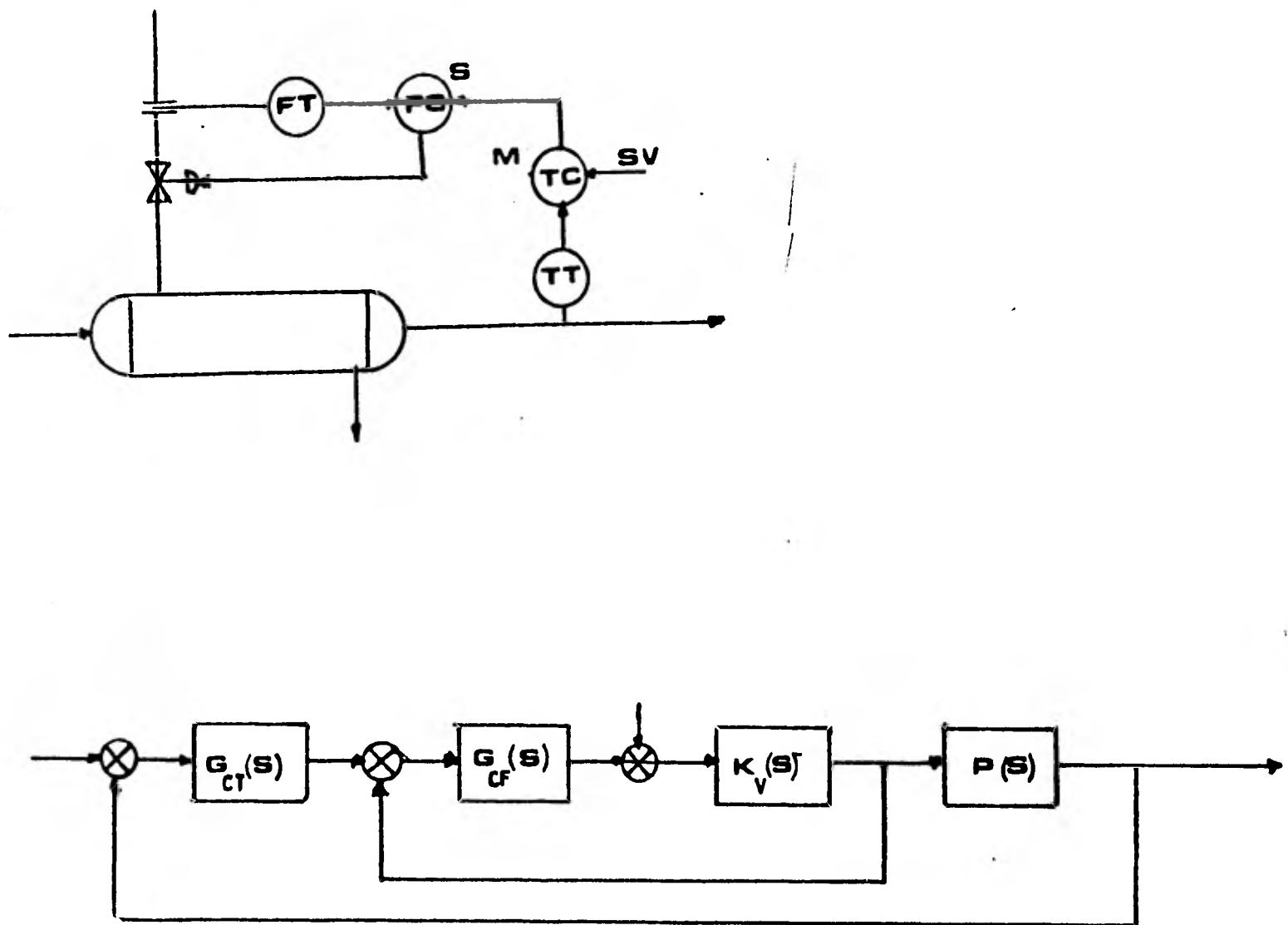


Figura 5.1 Sistema de control en cascada en un intercambiador de calor a base de vapor.

El utilizar un segundo controlador, reduce el efecto de los cambios en el suministro en el momento en que ocurren y por ello mejora el tiempo de respuesta del proceso. A fin de

5.2 Sistemas de Control de Relación.

En un sistema de este tipo lo que se controla es la relación R entre dos variables X e Y , las cuales se miden en forma continua. Se trata de que:

$$R = \frac{X}{Y} = \text{cte.}$$

Lo cual se consigue modificando una de las variables en función de los cambios en la variable que se considera primaria. En la figura 5.2 se representa el diagrama de bloques de un sistema de control de relación, en la cual el valor fijado se calcula mediante la estación de relación y la variable primaria Y ; $SV = R.Y$

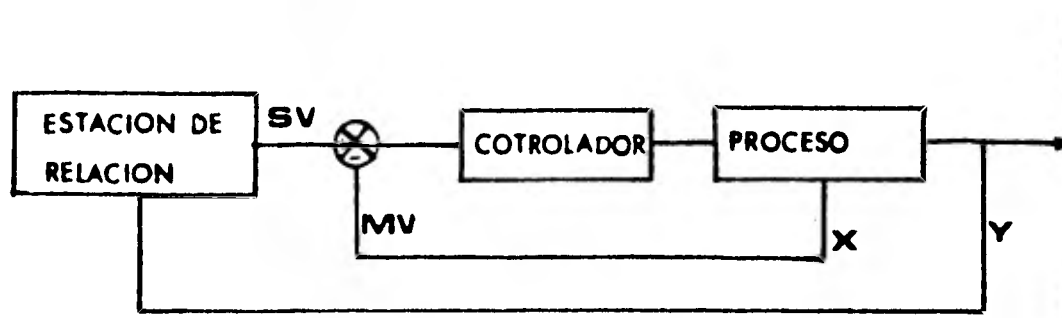


Figura 5.2 Diagrama de bloques de un sistema de control de relación

El valor así calculado se compara con el valor real de X y si existe diferencia el controlador corrige el estado de la variable secundaria. Para aclarar la idea, a continuación se explica el proceso que aparece en la figura 5.3.

Se trata de fabricar ácido clorhídrico (HCL) de concentración constante, mediante la absorción de cloruro de hidrógeno anhídrico en agua. Aquí la variable controlada es la relación constante R , la variable primaria es el gas de HCL y el -

que estos sistemas funcionen correctamente, la malla interior, cuando menos debe ser tan rápida como la exterior y de preferencia más rápida, en otro caso el sistema no funcionaría. En el ejemplo, la malla interior es el control del flujo de vapor mientras que la exterior es el control de la temperatura de salida.

Los sistemas de control en cascada pueden encontrarse con un solo controlador maestro, ajustando los valores fijados de varios controladores esclavos.

Para ajustar los controladores de un sistema de control en cascada, se recomienda el procedimiento siguiente:

- 1.- Colocar el controlador maestro en modo manual y ajustar el controlador esclavo usando cualquiera de los métodos ya expuestos. Cuando la malla interior responda bien a los cambios en el valor fijado debido al controlador maestro deberá detenerse el procedimiento de ajuste.

- 2.- Colocar el controlador esclavo en modo automático y ajustar el controlador maestro. Debe observarse que el proceso se controla mediante el controlador maestro, incluyendo el controlador esclavo por lo cual no deben cambiarse los ajustes de este último, cuando se este ajustando el controlador maestro.

En cuanto a los modos de control, se recomienda un controlador proporcional para la malla interna, siempre que el error de estado estable no sea importante para la variable manipulada. Algunas veces se adiciona el modo de reajuste, como en el caso del flujo ya que el modo proporcional unicamente, haría el control muy sensible al ruido, sin embargo, no es común utilizar acción derivada. Para la malla exterior se recomienda un controlador PI y raras veces PID.

agua es la variable secundaria. El agua se introduce en forma de rocío a la torre de absorción y se mezcla con el gas que entra por la parte superior de la torre.

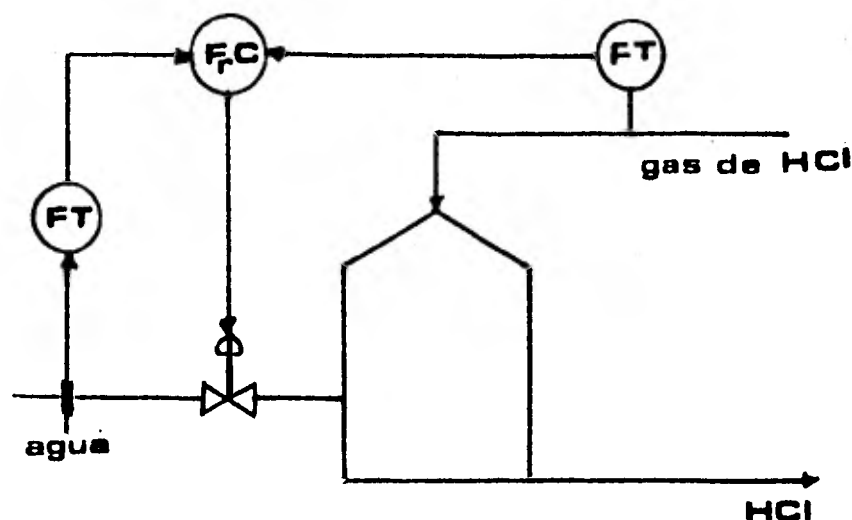


Figura 5.3 Esquema de una torre de absorción para producir HCl.

El valor del flujo de gas se multiplica por una constante R , la cual se ajusta en la estación de relación y el producto se convierte en el valor fijado (SV). El valor fijado se compara con el valor del flujo de agua y si existe desajuste, el controlador envía una señal a la válvula colocada en la línea del agua a fin de corregir el error.

Al implementar un sistema de esta naturaleza, debe de conseguirse que:

- a) Ambas señales sean medidas en las mismas unidades (m^3/hr , kg/hr , etc.)
- b) Ambas señales deben ser lineales o cuadráticas y
- c) Los rangos de los transmisores deben ser prácticamente iguales.

5.2.1 Control de relación de parte a total.- Este sistema es una variante del con estación de relación. Su esquema es el de la figura 5.4 y se usa en dos situaciones principalmente:

1).- Cuando es imposible medir el flujo independientemente antes de la adición del dependiente, lo que puede ocurrir por las siguientes causas:

- a) La línea de flujo puede estar inaccesible;
- b) La alta viscosidad puede hacer imposible medir el flujo conveniente (pero después de la dilución la viscosidad puede disminuir lo suficiente para que se pueda usar un medidor de flujo); y
- c) El flujo puede ser altamente corrosivo, pero una vez que ha sido agregado a la línea principal la solución resultante puede ser neutral y más adecuada para su medición.

2).- Cuando se desea agregar el líquido de mezcla a una relación determinada del total, lo cual es conveniente en algunos procesos químicos donde se desea medir y registrar el flujo total y también conocer qué tanto de este flujo total contiene un cierto porcentaje de la componente deseada.

El porcentaje se relaciona directamente al ajuste de la estación de relación, y es común la utilización de un registrador de dos plumas para mostrar tanto la componente agregada como el flujo total.

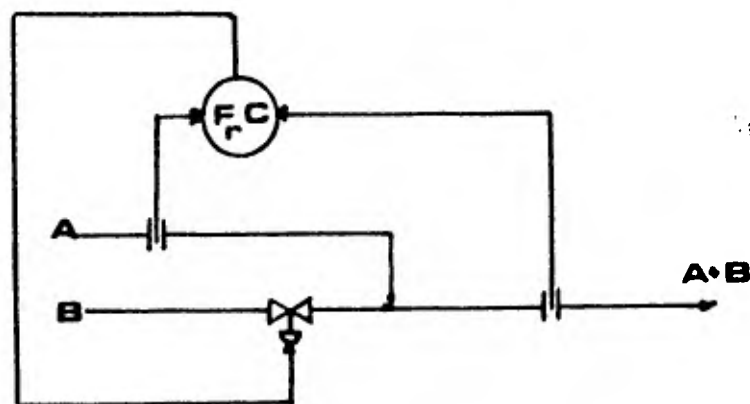


Figura 5.4 Sistema de control de relación de parte a total.

5.2.2 Control de relación de cantidades totalizadas.- En este sistema se totaliza la cantidad de la materia o compuesto dependiente y se compara como en el sistema de control de relación, ahora se considera el valor total del compuesto independiente que ha sido agregado durante el mismo período de tiempo.

La ventaja que brinda este sistema es que la totaliza

ción primero y comparación posterior de los flujos, permite ajustar en forma adecuada para que el porcentaje de la mezcla total sea preciso. La figura 5.5 representa el sistema descrito, así como su diagrama de bloques.

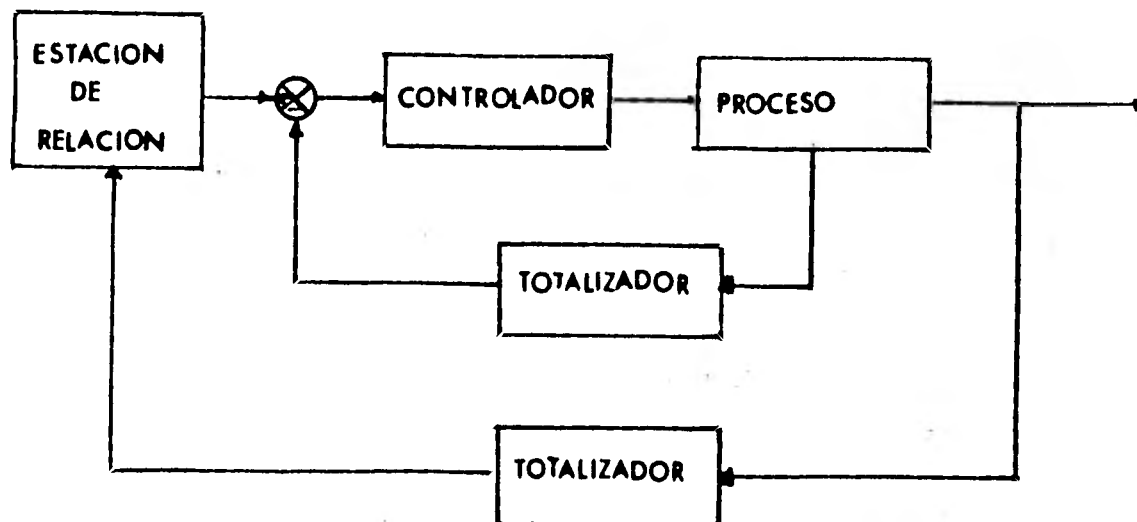


Figura 5.5 Sistema de control de relación de cantidades totalizadas a) Proceso b) Diagrama de bloques.

5.2.3 Control de relación entre dos variables diferentes.- En este sistema se miden dos tipos de variables tales como una presión y una temperatura, una presión y un flujo, etc., y se calcula una relación entre ellas a fin de optimizar la operación del equipo o para garantizar la operación estable. Por ejemplo en la operación de los compresores de aire axiales, existe una zona de trabajo típica en la cual la operación se torna inestable debido a que el flujo de aire es pequeño, o la presión muy alta, este fenómeno se conoce como "surge". En este caso se utiliza el control de relación para mantener el compresor dentro de la zona de estabilidad, mediante la derivación de una parte de su carga, con lo cual aumenta el flujo de aire a través del compresor.

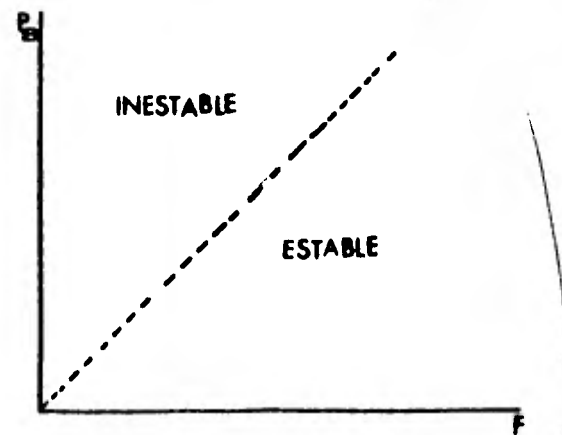
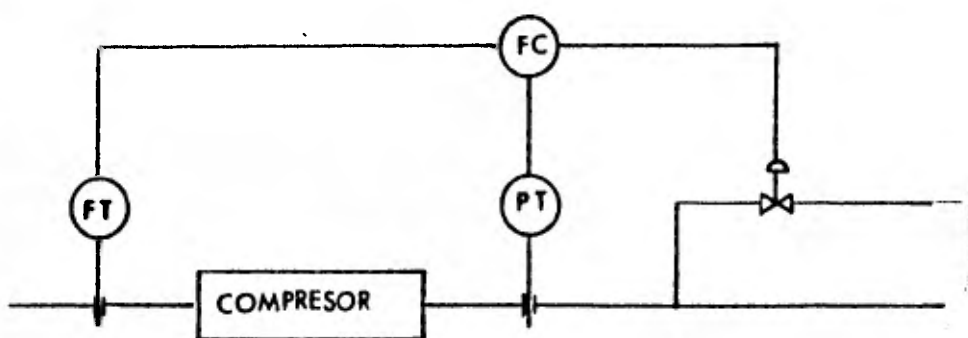


Figura 5.6 Compresor de aire tipo axial controlado por relación de variables

En la figura 5.6 se muestra un compresor con succión atmosférica, en el cual se mide el flujo de entrada y la presión de salida. La presión de salida en este caso es una función de la relación de compresión, debido a que la presión de entrada es constante y se utiliza para calcular el valor - fijado para una relación de compresión específica. Cuando el punto de operación trata de caer en el lado izquierdo de la línea crítica, se abre la válvula de relevo lo necesario para evitar la inestabilidad.

5.3 Sistema de control realimentado con corrección anticipada

Los sistemas de control con tiempos muertos grandes, tienen la desventaja de que el controlador trabaja de acuerdo a una señal del proceso que no es la condición presente de éste. Los cambios en la carga no se detectan de inmediato y por lo tanto se retrasa la corrección, la cual ocurre frecuentemente cuando ya no se necesita, debido a que el cambio de carga pudo haber desaparecido en ese lapso.

En la figura 5.7 se presenta un calentador a fuego directo, en el cual puede variar el flujo de alimentación en forma considerable. Debido a la longitud de los serpentines se tienen tiempos muertos grandes que hacen que el control de temperatura convencional, no resulte adecuado, ya que la temperatura de salida no es una buena indicación de los cambios que se puedan presentar un instante posterior a consecuencia de los cambios en el flujo de entrada. Por ejemplo si disminuye el flujo de entrada, transcurrirá cierto tiempo antes de que aumente la temperatura de salida y por tanto para que el controlador comience a corregir el valor de esta variable, limitando el combustible. Durante este intervalo de tiempo el flujo de entrada pudo haberse restablecido, de modo que el proceso necesite mas calor que el que esta recibiendo en ese instante.

Con el fin de evitar la situación descrita se utiliza el sistema de control realimentado con corrección anticipada. Como se aprecia en el diagrama de la figura 5.7, el calentador a fuego directo tiene un medidor de flujo de entrada (FT) el cual envía la información del flujo al corrector (FY). Este corrector también esta recibiendo la señal de salida del controlador de temperatura.

La función de transferencia del corrector es:

$$\frac{M_{TY}}{F(S)} = K_1 S$$

Esta señal M_{TY} se suma algebraicamente con la salida del controlador de realimentación (M_C). De la figura 5.8, se observa que cuando el flujo es constante $M_{TY}(t)$ vale cero por lo cual el controlador de realimentación es el único que determina la posición de la válvula de control. La ventaja de este sistema es que la corrección anticipada es mayor cuanto mayor es el cambio en el flujo de entrada.

Debe notarse la diferencia de este sistema de control con uno en cascada ya que aquí se mide el flujo de la carga, -

mientras que en el control en cascada se mide el flujo de combustible.

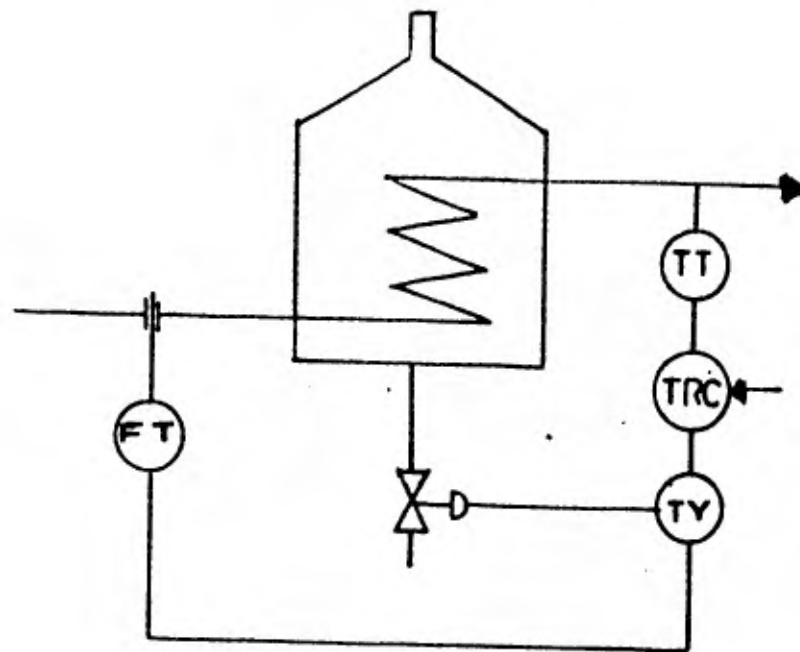


Figura 5.7 Calentador a fuego directo con control realimentado y corrección anticipada.

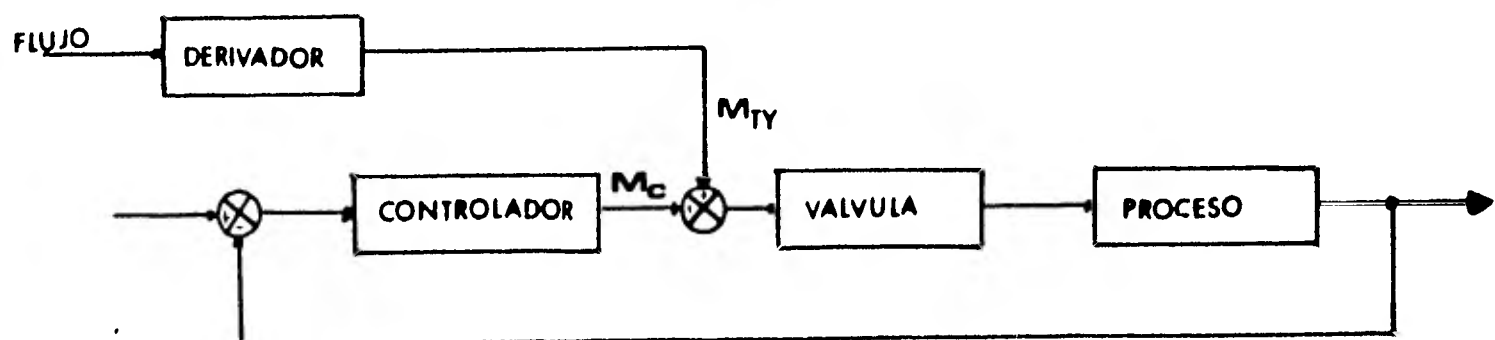


Figura 5.8 Diagrama de bloques de un sistema de control realimentado con corrección anticipada.

Este tipo de sistemas se utiliza cuando se conoce y se puede medir la principal fuente de errores en el estado del proceso o cuando no se puede medir la variable controlada. El control prealimentado:

- a) mide las perturbaciones
- b) calcula su efecto y
- c) modifica el proceso.

La diferencia entre pre y realimentación es que el primero corrige según el valor de las perturbaciones y el segundo según el valor de la variable controlada. En los sistemas de control realimentados, se corrige después de que la variable controlada ha cambiado respecto del valor fijado y en el sistema prealimentado la corrección tiene lugar antes de que la variable controlada cambie respecto del valor fijado. Así los factores que determinan que la realimentación puede resultar inadecuada son: cuando se tienen perturbaciones frecuentes y de magnitud considerable y/o grandes retrasos de tiempo en el proceso, En estos casos el sistema prealimentado tiene un desempeño mejor, algunos de los procesos en que se emplea esta estrategia son: columnas de destilación, máquinas para papel, reactores, hornos, etc., ya que presentan grandes constantes de tiempo y/o tiempos muertos.

Es erróneo pensar que el control prealimentado puede sustituir al sistema de control realimentado, la utilización de ambas estrategias resulta muy ventajosa debido a que el controlador de prealimentación estará limitado por la complejidad del modelo matemático y la exactitud del mismo. Las inexactitudes pueden ser causa de que la variable controlada tenga error de estado estable, el cual puede ser iluminado mediante el modo de reajuste del controlador convencional. Además el controlador de prealimentación no puede compensar las perturbaciones no medidas, lo cual si puede hacer el controlador de realimentación.

Como se ve usar ambos controladores, permite que uno compense las limitaciones del otro y viceversa.

La figura 5.9 representa un esquema de control prealimentado aplicado a un intercambiador en el cual se mide el flujo y la temperatura a la entrada. El controlador calcula la posición de la válvula según el modelo matemático y el valor particular de estas dos variables a fin de que pase el flujo de vapor necesario para conseguir la temperatura deseada en el líquido de salida.

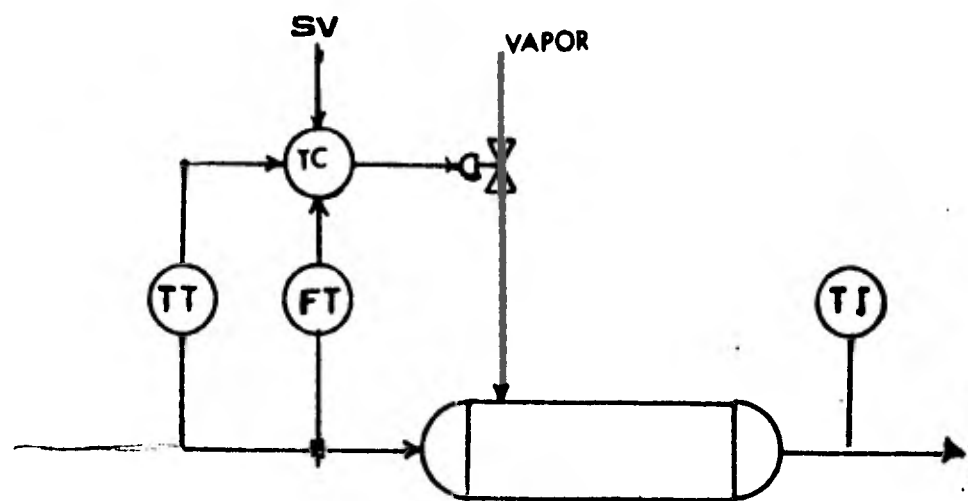


Figura 5.9 Sistema de control prealimentado que controla la temperatura del fluido a la salida del intercambiador.

La figura 5.10 es un sistema de control prealimentado con realimentación en el cual el valor de la temperatura de salida se conecta al controlador de realimentación. Si existe algún error la salida de este controlador modifica el valor fijado del controlador de prealimentación.

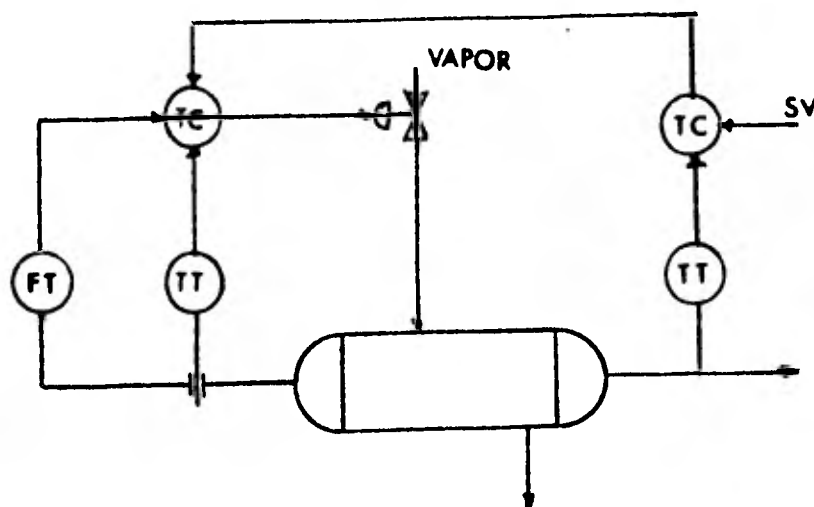


Figura 5.10 Sistema combinado de prealimentación y realimentación para controlar la temperatura en un intercambiador.

5.5 Sistemas de control multivariable

En muchos casos se requiere manipular mas de una variable a fin de controlar una o más de las variables de salida del proceso, por lo cual, hace necesario establecer cuales son las condiciones que se requiere controlar y las variables que nos pueden ayudar a conseguirlo. En la figura 5.11 se muestra el diagrama de bloques de un proceso multivariable. Dentro de este esquema podría representarse por ejemplo el control de tensión eléctrica, frecuencia y ángulo de fase en un sistema eléctrico.

Aquí las variables que se pueden manipular a fin de corregir el proceso son entre otras la tensión del campo del generador, la velocidad de la turbina, así como la compensación de reactivos. Otro ejemplo de control multivariable, se muestra en la figura 5.12 el cual es un proceso que consiste en controlar la composición y el gasto de un compuesto a la salida del reactor en el cual se desea la composición determinada por:

$$C = \frac{W_A}{W_A + W_B} = \text{etc.}$$

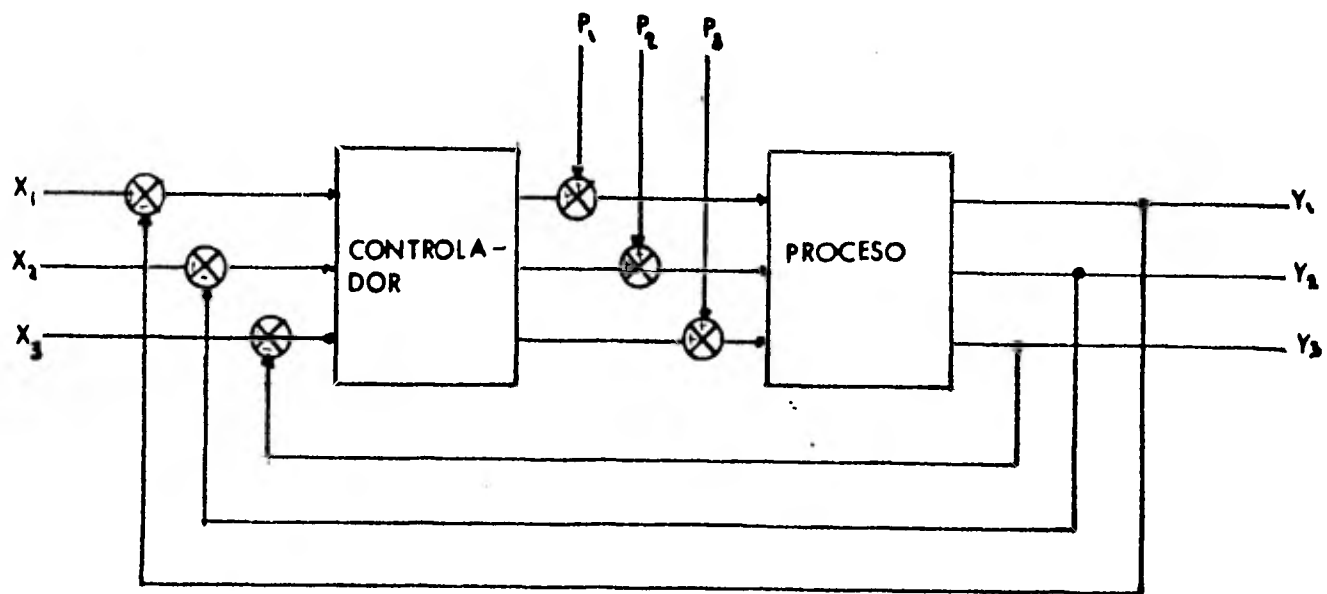


Figura 5.11 Diálogo de bloques de un sistema de control multivariable.

y el gasto de salida por:

$$W_C = W_A + W_B$$

El control se consigue manipulando el gasto de entrada del compuesto A (W_A) así como el gasto de entrada del compuesto B (W_B).

Se ve que al modificar cualquiera de los gastos de entrada, se cambian los valores del gasto de salida, así como la composición. El grado de interacción, depende de la relación de los flujos W_A Y W_B . Cuando la interacción es severa se requiere diseñar un desacoplador, el cual puede diseñarse para operación en estado estable o incluir la dinámica del proceso.

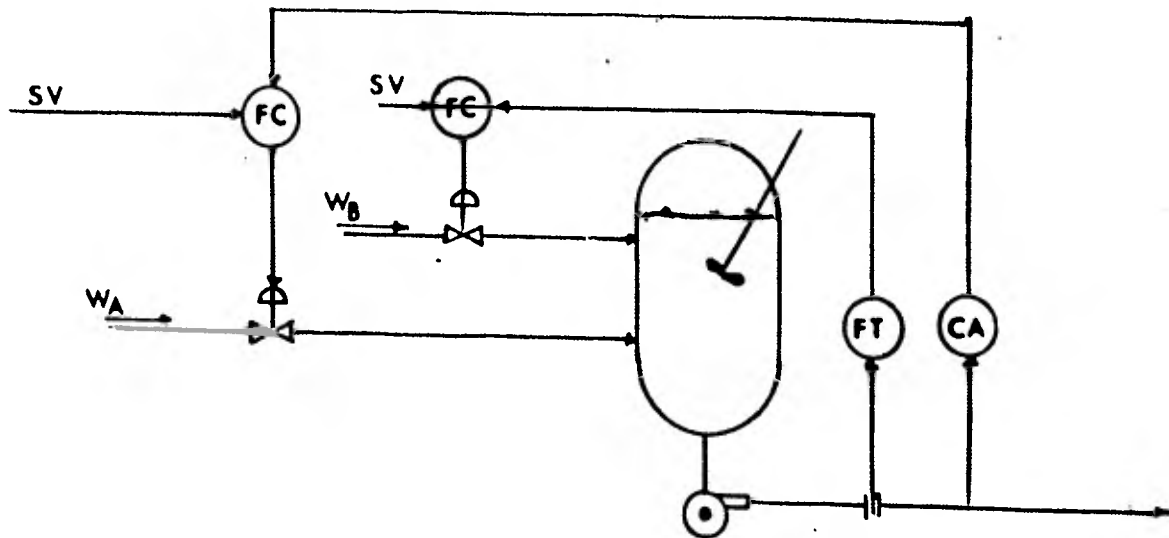


Figura 5.12 Sistema de control multivariable para controlar el gasto y la composición del producto de salida del reactor.

Una vez que se resuelve el desacoplamiento, el sistema de control puede implementarse sin considerar las interacciones. El diagrama de bloques del sistema de control de composición y gasto con ajuste independiente de las variables, se presenta en la figura 5.13.

Tradicionalmente no se empleaba el control multivariable de manera abundante, sin embargo, debido a la creciente utilización de las computadoras en el control de procesos y a su capacidad para la implementación de las técnicas de desacoplamiento, ha aumentado la utilización de esta estrategia. Algunos ejemplos donde se aplica el control multivariable son: calentadores de agua de contacto directo, columnas de destilación, reducción de presión de gas en dos etapas, fabricación de sal industrial, etc.

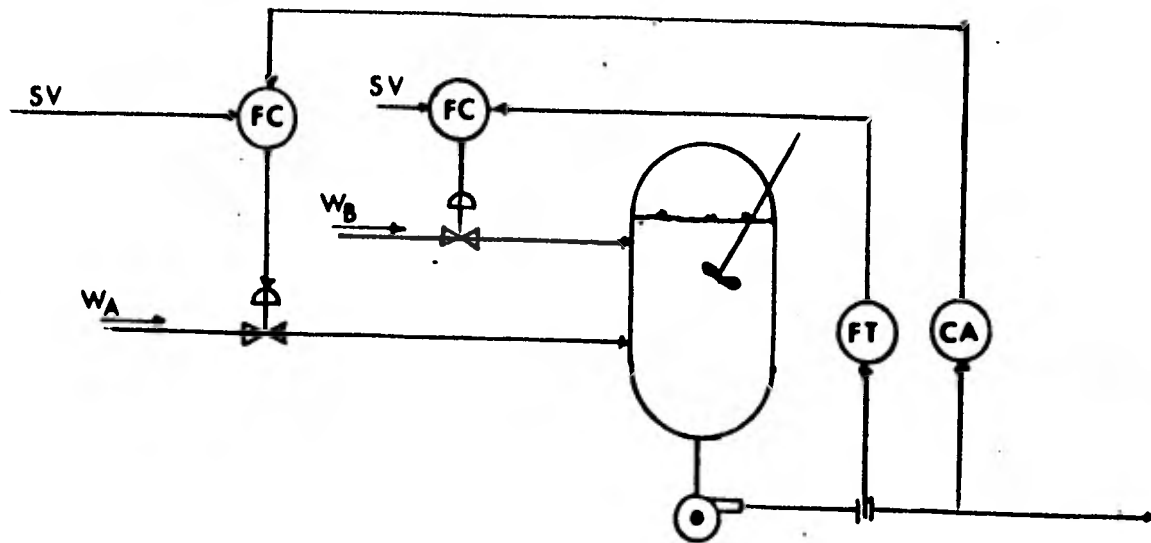


Figura 5.12 Sistema de control multivariable para controlar el gasto y la composición del producto de salida del reactor.

Una vez que se resuelve el desacoplamiento, el sistema de control puede implementarse sin considerar las interacciones. El diagrama de bloques del sistema de control de composición y gasto con ajuste independiente de las variables, se presenta en la figura 5.13.

Tradicionalmente no se empleaba el control multivariable de manera abundante, sin embargo, debido a la creciente utilización de las computadoras en el control de procesos y a su capacidad para la implementación de las técnicas de desacoplamiento, ha aumentado la utilización de esta estrategia. Algunos ejemplos donde se aplica el control multivariable son: calentadores de agua de contacto directo, columnas de destilación, reducción de presión de gas en dos etapas, fabricación de sal industrial, etc.

Figura 5.13 Sistema de control multivariable con ajuste independiente de la composición y del flujo.

5.6 Sistemas de control adaptivo

Los sistemas industriales tienen dos características por las cuales se degrada el desempeño de los sistemas de control convencionales:

- a) Las mallas de control son no-lineales
- b) Las características y parámetros cambian con el tiempo.

Con objeto de resolver esos problemas, se desarrollaron los sistemas de control adoptivos. En estos los parámetros se ajustan automáticamente para compensar los cambios correspondientes en las propiedades del proceso. Según el objetivo para el cual se diseñan podemos clasificar los sistemas de control - adoptivo como:

- a) Sistema adoptivo de estado estable.- el cual se diseña para mantener una ganancia de malla de estado estable constante.

- b) Sistema adoptivo dinámico.- el cual se diseña para mantener un factor de amortiguamiento constante durante la respuesta transitoria.

También se puede clasificar de acuerdo al mecanismo, por ejemplo:

- a) Programando.- en el cual los ajustes de los parámetros se relacionan con los cambios en las variables del proceso medidos
- b) Auto-adaptivo.- en el cual los ajustes se hacen de acuerdo a la medición de la función objetivo.

En la figura se presenta un intercambiador en el cual se usa un sistema de control adoptativo que compensa dinámicamente mediante la programación de los ajustes del controlador - según el valor de gasto y de temperatura de entrada.

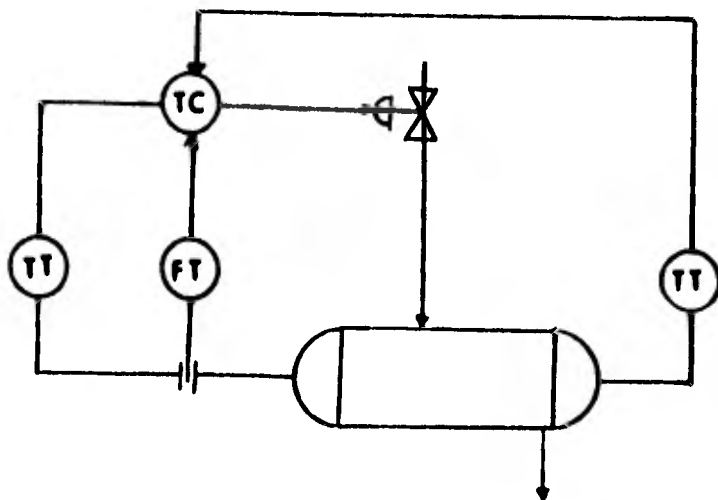


Figura 5.14 Sistema de control adoptivo programado aplicado a un intercambiador de calor.

Este es un sistema de control en el cual se realizan una serie de eventos definidos, para que una cierta variable manipulada pueda tener primero preferencia para el control de un proceso.

Lo anterior se ilustra en la figura 5.15 en la que el sistema selecciona la mejor fuente de agua para un calentador - deareador de agua de alimentación. A medida que el nivel en el calentador deareador comienza a disminuir, agua caliente del tanque correspondiente se empieza a agregar para permitir cambios de nivel normales. El uso de agua caliente evita desajustes de temperatura en el sistema de deareación que puedan causar dificultades en el proceso.

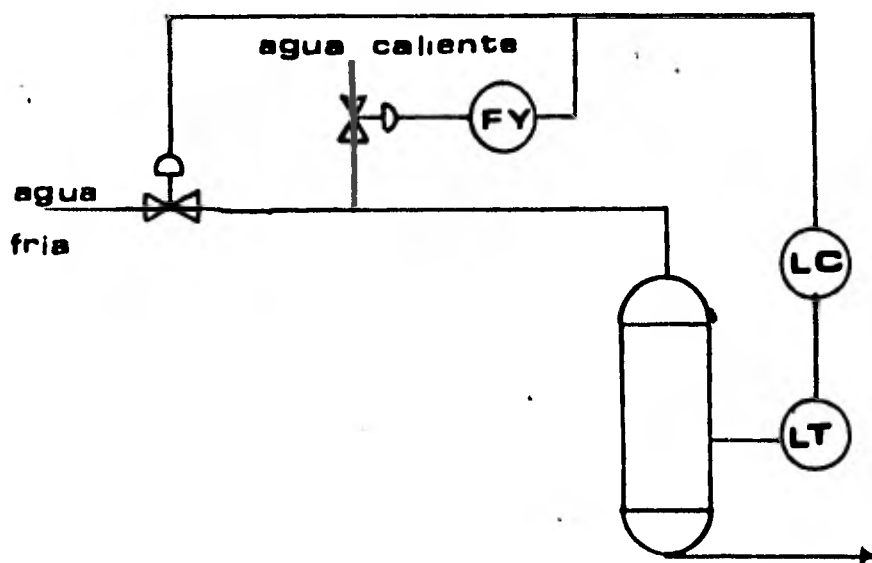


Figura 5.15 Calentador deareador de agua de alimentación con sistema de control de rango dividido.

Sin embargo, si la demanda de agua deareada pudiera persistir y el nivel continuara fallando, la línea de agua ca-

liente no sería la adecuada por más tiempo; y en este punto se deberá agregar agua fría a la línea de servicios auxiliares.

5.8 Sistema de control de predominio

Algunas veces es necesario limitar el valor de una - cierta variable (valor alto o bajo), para evitar daños en el proceso o el producto, y en estos casos se impone el uso de un sistema de control de predominio.

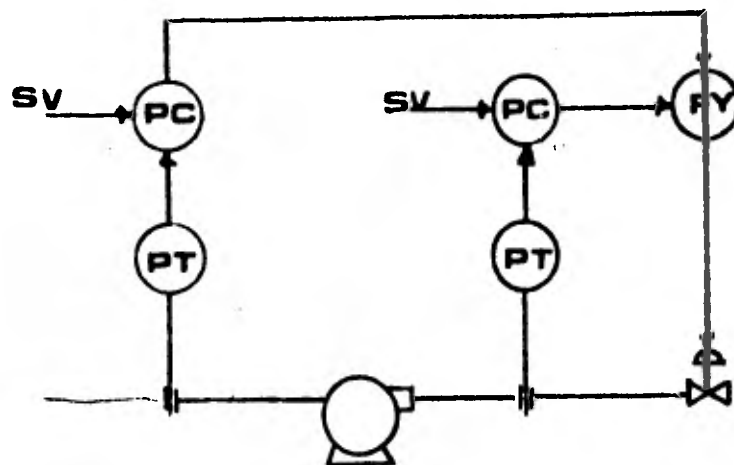


Figura 5.16 Bomba con sistema de control de predominio.

Ejemplos de esto pueden encontrarse en estaciones de bombeo donde a menudo el requerimiento es mantener dentro de límites seguros tanto la presión en la succión como también en la descarga de la bomba, como puede verse en la figura 5.16

El sistema trabaja de modo que existe un circuito de control operando normalmente en una de las posibles variables, y continúa de esta forma hasta que la otra variable llega a un - cierto valor crítico. En este punto, esta última variable se - convierte en el factor de control hasta que las condiciones crí- ticas son remediadas. En la figura 5.16, las salidas de los dos controladores de presión están conectadas a un selector de baja señal, estando el valor fijado del controlador de succión abajo de la presión de operación normal; y su señal de salida estará a

un máximo debido al error positivo con respecto al valor fijado.

El controlador en la descarga es una unidad de acción invertida y tiene su valor fijado a la presión de salida deseada. Consecuentemente su salida está normalmente abajo de la del controlador de succión.

Como las dos señales de salida de los controladores van a un relevador selector de baja señal, este último dejará pasar la más baja (en este caso la de la presión de descarga), bajo condiciones de operación normal. Sin embargo, si la presión de succión cayera abajo de su valor fijado, la salida de su controlador de presión decrementaría, llegando a un valor menor que la señal de descarga. Consecuentemente, el controlador de presión de la succión tomaría la acción sobre la válvula y mantendría la operación satisfactoria.

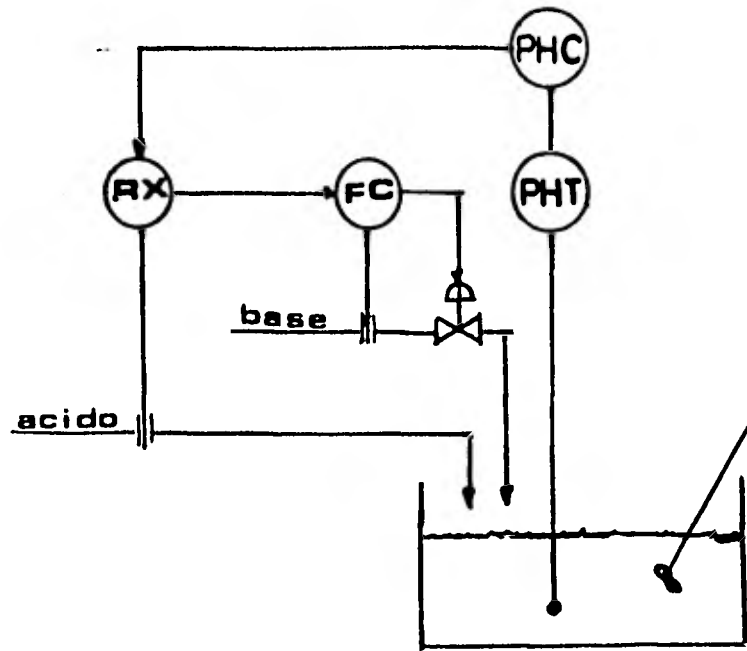
5.9 Sistema de control de punto final

El control de punto final es una combinación de sistemas en cascada y de relación, con lo que se logra que la relación de la variable dependiente (o controlada), a la variable independiente (o no controlada), sea automáticamente ajustada por la variable final del proceso.

Una aplicación típica se muestra en la figura 5.17 y aquí un analizador de punto final se usa para medir y controlar los dos ingredientes que formarán el producto que se quiere mezclar. El proceso involucra la neutralización de una corriente ácida por medio de otra corriente básica bajo control del pH.

Cuando con el análisis del producto final se detectan cambios en el valor fijado, la salida del controlador ajusta la relación automáticamente, de modo que los dos flujos son relacionados correctamente. Aquí, la variable dependiente está bajo control con su valor fijado determinado por el relevador de relación.

Otra aplicación común es el control de la relación aire-combustible en un horno, por la medición del contenido de oxígeno en los gases de salida.



5.17 Sistema de control de punto final para un tanque de mezclado de neutralización.

Introducción

En los procesos industriales, los elementos finales de control son muy importantes ya que constituyen el medio para controlar los flúidos del proceso, a partir del bajo nivel de señal proveniente del controlador. Dichos elementos de control están sujetos a condiciones severas de temperatura, presión, corrosión, contaminación y no obstante deben cumplir satisfactoriamente su función de manipular los flúidos del proceso.

Debido a que en el mayor número de las aplicaciones, se utiliza la válvula de control como elemento final de control, este capítulo se dedica a estudiar estos elementos. Sin embargo, existen otros elementos finales de control tales como calentadores eléctricos de resistencia, bombas de velocidad variable, válvulas solenoide etc.

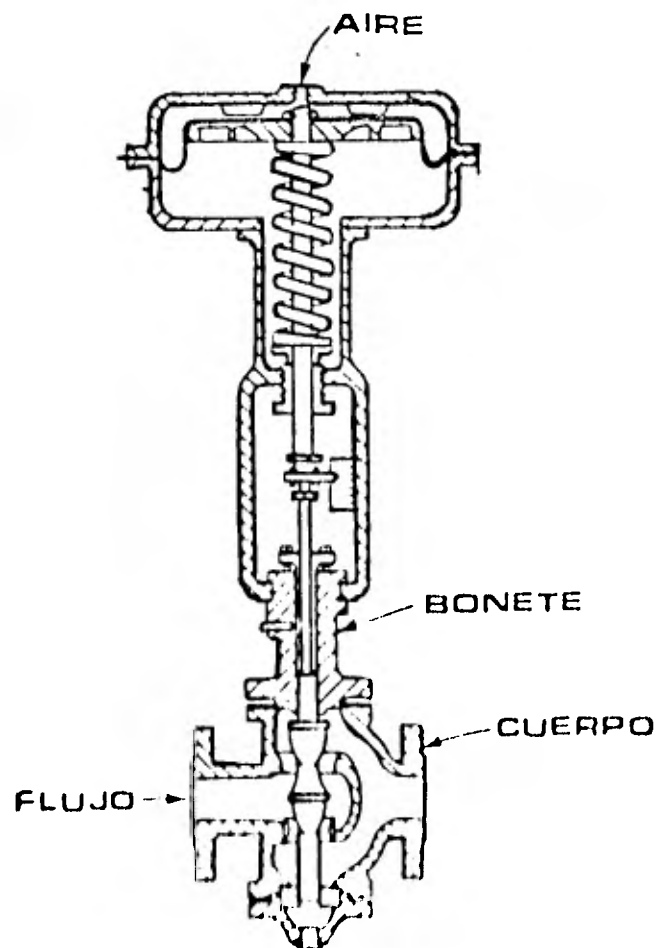


Figura 6.1 Partes integrantes de una válvula de control.

Fundamentalmente la válvula de control está constituida por el cuerpo y por el actuador. El fluido pasa a través de un orificio variable que se forma entre el asiento y el tapón. El tapón está unido al actuador mediante un vástago, el actuador recibe una señal neumática de 3 a 15 - psig y la convierte en un desplazamiento mediante el diafragma. El actuador de diafragma es el más empleado aún con instrumentación electrónica, en este caso se utiliza un convertidor de corriente eléctrica a presión antes de la válvula.

El cuerpo de la válvula puede ser de tipo Globo, Mariposa, Bola o de Diáfragma. Las válvulas más comunes son las de tipo Globo y dentro de estas las de tipo caja o jaula son las más comunes.

Es posible encontrar válvulas que abran al aumentar la presión en el actuador y se les conoce como tipo aire para abrir (A.O.). Cuando al aumentar la presión se cierra la válvula se les conoce como aire para cerrar (A.C.)

Posición	Abierto	Cerrado	Tipo
Presión	15	3	A.O.
psig	3	15	A.C.

6.2 Característica de Flujo de la Válvula.

Por característica de flujo de una válvula de control se entiende, la función que relaciona la apertura de la válvula, con el porcentaje del flujo total que pasa por ella. El gasto a través de la válvula depende de su tamaño, la caída de presión a través de la misma, la posición del embolo de la válvula, así como de las propiedades del fluido.

$$W = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$$

donde:

$W \hat{=}$ gasto

$C_v \hat{=}$ coeficiente de la válvula o factor de capacidad

$G \hat{=}$ densidad relativa

$\Delta P \hat{=}$ caída de presión a través de la válvula.

Las distintas relaciones entre el porcentaje de flujo y el porcentaje de apertura, se logran mediante la forma del tapón y del asiento. Las características usuales en las válvulas son: La Lineal, La Igual Porcentaje, La Apertura Rápida y La Parabólica, aún cuando esta última es poco usual.

En la figura 6.2 se muestran las características inherentes de las válvulas de control. En estas curvas se considera que la caída de presión a través de la válvula permanece constante

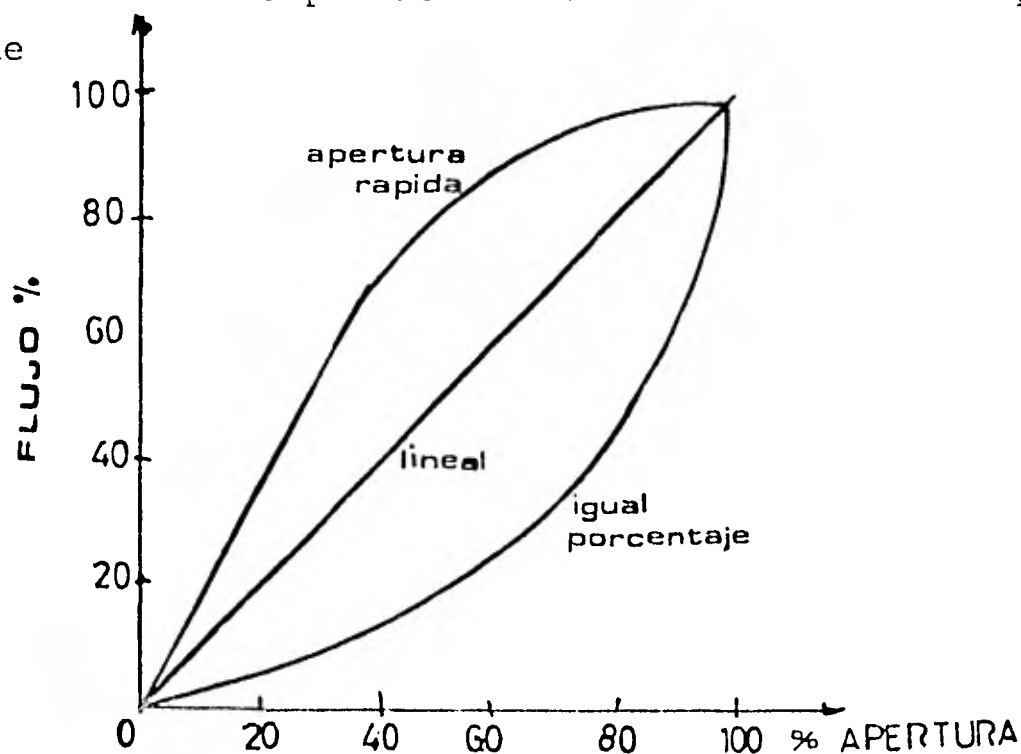


Figura 6.2 Características de flujo de las válvulas de Control.

La característica de apertura rápida permite grandes flujos desde el principio de la carrera del vástago, como se ve en la figura 6.2, es posible tener un 70% del flujo total con solo el 40% del recorrido del vástago. Esta característica, se aplica generalmente en sistemas de control ON-OFF.

En la característica lineal se pretende que para cada porcentaje de apertura, se tenga el mismo porcentaje de flujo,

por ejemplo al 60% de apertura se tiene el 60% del flujo total. La válvula de característica Lineal se especifica para sistemas de control de nivel y para ciertas aplicaciones de control de flujo que requieren ganancia constante. En realidad la característica de la válvula deja de ser lineal si la caída de presión aumenta al disminuir la apertura, o disminuye al aumentar la apertura, esta deformación de la característica lineal se compensa con la característica de igual porcentaje.

En la característica de Igual Porcentaje, para incrementos de apertura iguales ΔV_p , se tienen cambios de igual porcentaje del flujo respecto del valor anterior a que ocurra el cambio. De la figura 6.2 se puede observar que el cambio de flujo entre el 40% y el 60% de apertura es aproximadamente el doble del cambio del porcentaje de flujo entre el 20% y el 40% de apertura, y así cada que la apertura se incrementa en 20%, el porcentaje de flujo se duplica aproximadamente. Debido a lo anterior cuando la válvula está parcialmente cerrada, los cambios en el porcentaje de flujo son pequeños y éstos son grandes para los cambios en el porcentaje de apertura mayores.

Las válvulas con característica de Igual Porcentaje se utilizan en sistemas de presión y en otras aplicaciones en donde un gran porcentaje de la caída de presión se absorbe en la válvula. Así mismo se deben de usar válvulas de Igual Porcentaje cuando se tenga una fuerte variación en las condiciones de caída de presión. La relación funcional entre el porcentaje de flujo y el porcentaje de recorrido del tapón es:

$$\frac{\Delta W}{W} = K \Delta V_p$$

donde:

K = constante de proporcionalidad generalmente

$$K = 4$$

Relación Gama.- Se acostumbra definir como relación Gama de una válvula al cociente entre los extremos máximo y mínimo del rango del flujo controlable. Se entiende como rango de flujo controlable al intervalo de flujo que sigue una característica bien definida. Según se aprecia de la figura 6.3 el flujo controlable comprende del 15 al 90 % por lo que la relación Gama para este caso es:

$$\text{Gama} = \frac{90}{15} = 6$$

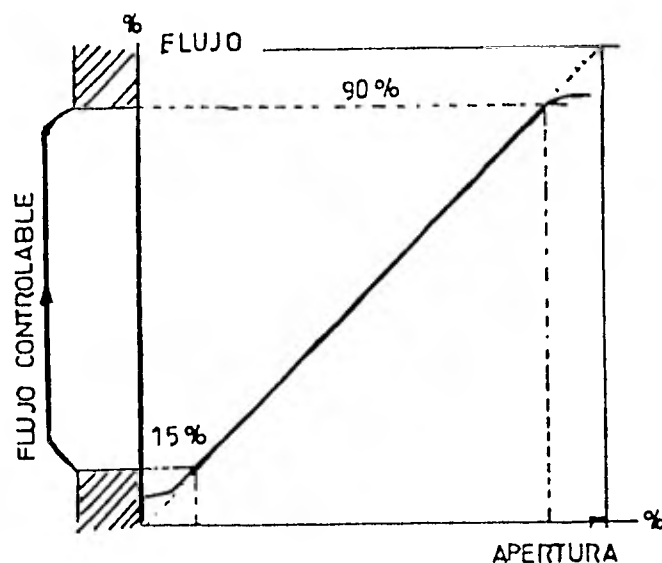


Figura 6.3 Determinación de la relación Gama.

6.3 Tipos de Válvulas de Control.

Válvulas Tipo Globo.- En estas válvulas el orificio a través del cual pasa el fluido, se constituye por el asiento, que forma parte del cuerpo, y el tapón, que está unido al émbolo. Al orificio se le denomina puerto y es común encontrar válvulas de puerto sencillo como la de la figura 6.4 y válvulas de puerto doble como la que se muestra en la figura 6.5.

Las válvulas de puerto sencillo se usan cuando se requiere de un sello hermético. Utiliza actuadores potentes ya que el fluido presenta una gran fuerza en sentido opuesto al cierre de la válvula, esta fuerza es ejercida sobre el tapón.

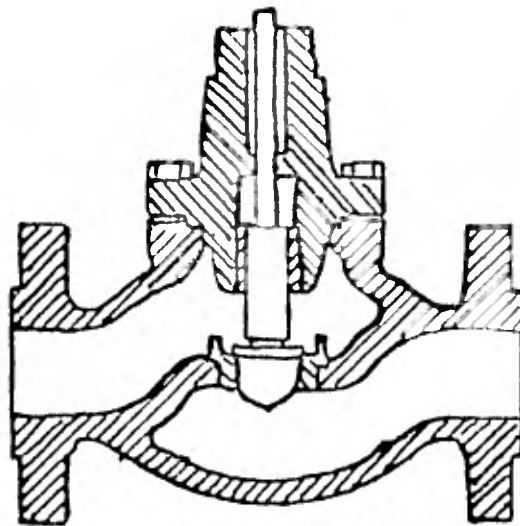


Figura 6.4 Válvulas tipo globo puerto sencillo.

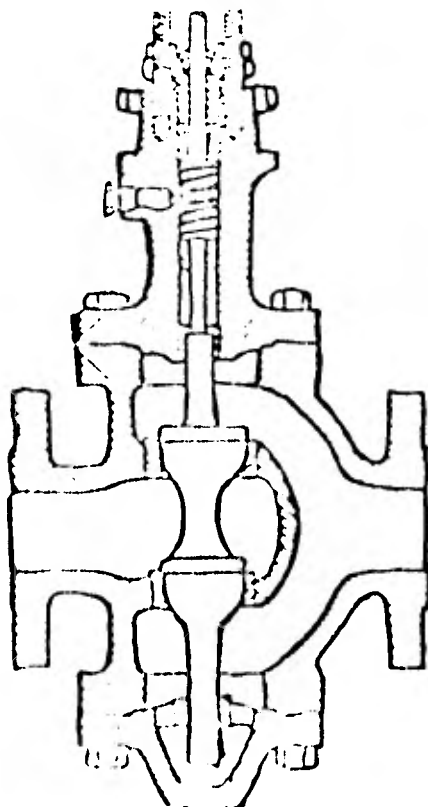


Figura 6.5 Válvula tipo globo puerto doble.

Las válvulas de puerto doble tienen una capacidad de flujo mayor y la ventaja de que la fuerza sobre el tapón inferior está balanceada con la fuerza ejercida en el tapón superior. Sin embargo, estas válvulas pueden permitir algo de flujo aún estando cerradas, debido a que ambos tapones no pueden asentar perfectamente en forma simultánea.

La característica de control de las válvulas de globo se logra con la forma del tapón. Existen distintos tipos de tapones como se muestra en la figura 6.6.

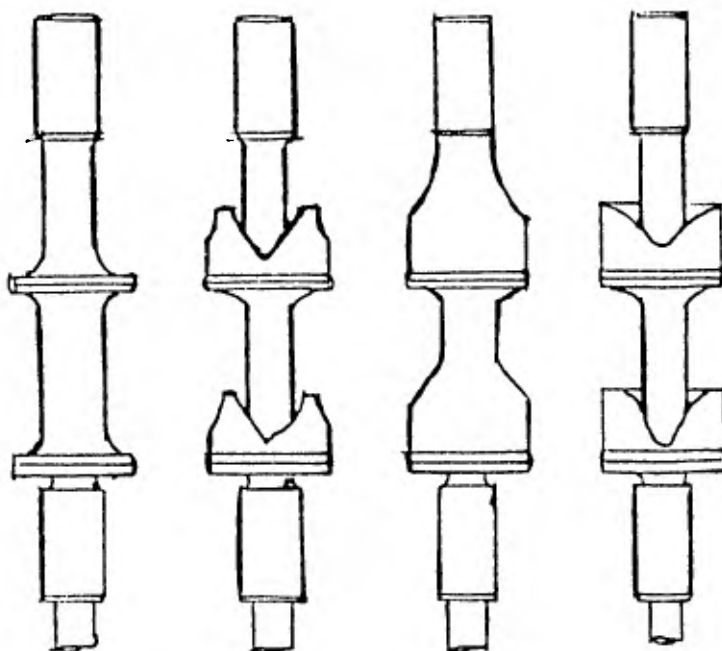


Figura 6.6 Diferentes tapones de válvula de control tipo globo.

Los cuerpos de las válvulas tipo Globo pueden ser de conexiones bridadas, roscadas, entre bridas o soldables. La selección depende de las especificaciones de la tubería en donde sean montadas y del tamaño de la válvula.

Las válvulas bridadas, van desde 3/4" hasta 12" aunque su tamaño se limita generalmente a 6" por razones de costo.

Cuando la temperatura del proceso es extremosa, se pueden considerar bonetes de extensión con aletas de radiación, para evitar daños en el actuador figura 6.7.

Una variante en la constitución del puerto de la válvula de globo, es el tapón tipo JAULA o CAJA. Actualmente es el tipo más utilizado en válvulas de control en tamaños de 3/4" a 6".

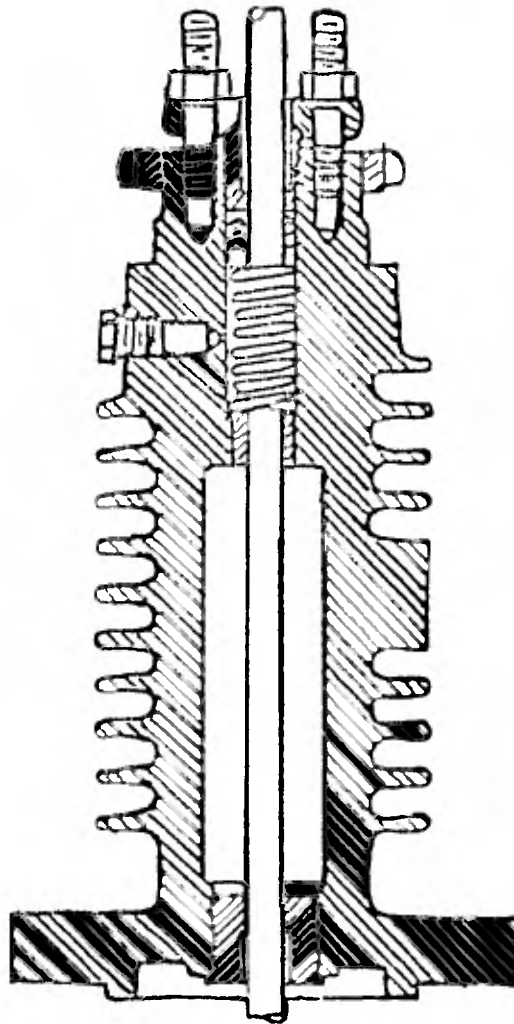


Figura 6.7 Disipador de calor para aplicación de válvulas manejando líquidos a elevadas temperaturas.

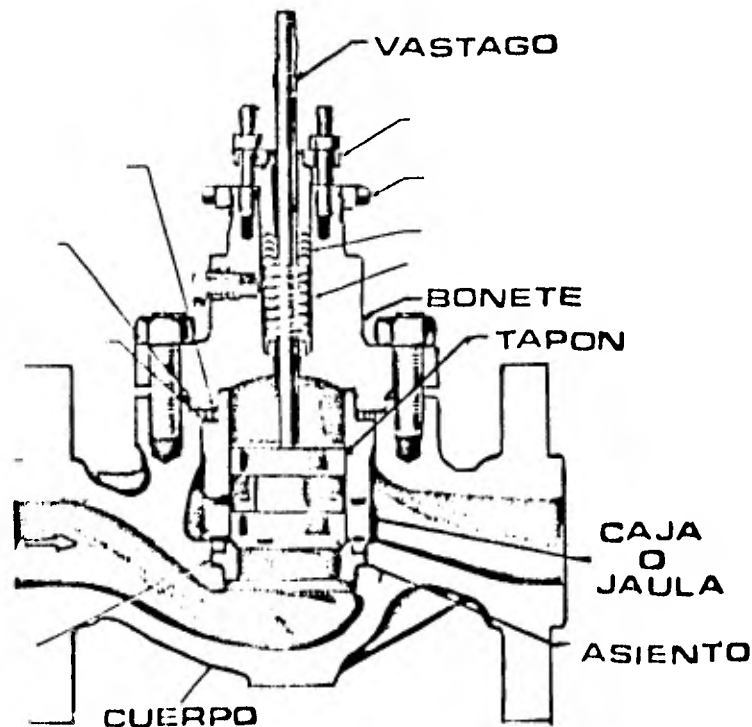


Figura 6.8 Válvula con tapón tipo Jaula o Caja.

En este tipo de válvulas el tapón es un pistón que desliza sobre una caja cilíndrica con aberturas cuya forma da la característica de control de la válvula. En la figura 6.8 se presenta el cuerpo de la válvula y en la figura 6.9 los diferentes

tipos de cajas. Las válvulas de globo tipo jaula, pueden ser balanceadas o desbalanceadas. Una válvula balanceada tiene una comunicación del fluido entre la cara inferior del pistón y la superior, con objeto de igualar las presiones. La válvula desbalanceada tiene un cierre más hermético que la balanceada, pero requiere de un actuador de mayor potencia.

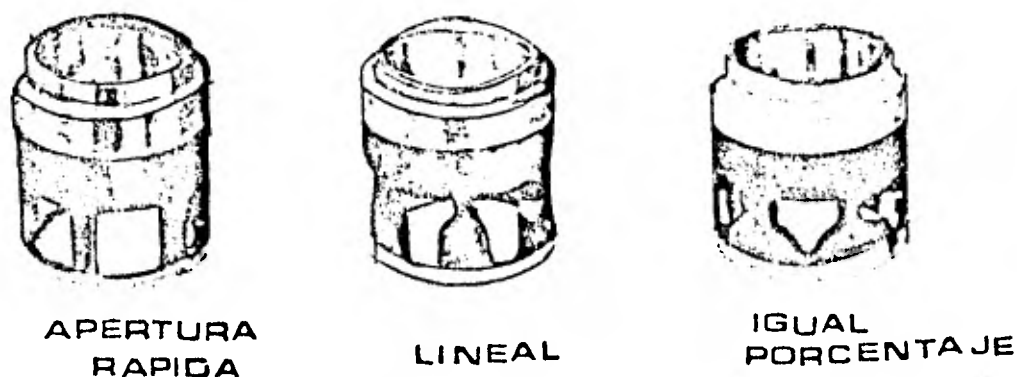


Figura 6.9 Diferentes tapones tipo caja para las características de apertura rápida, igual porcentaje y lineal.

Válvulas tipo Mariposa.- Es una válvula de tipo rotatorio y se aplica generalmente cuando se requiere manejar una gran cantidad de flujo, su tamaño va desde 2" hasta 36". Su construcción es muy sencilla, su costo bajo, sus dimensiones y peso son pequeños. Están limitadas a caídas de presión pequeñas.

La válvula de mariposa consta de un cuerpo muy sencillo de forma anular y del tamaño de la tubería, su instalación es entre bridas.

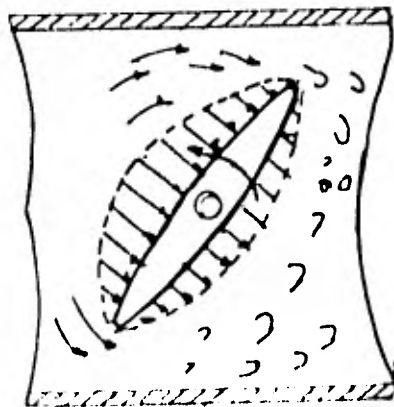


Figura 6.10 Corte seccional del cuerpo de una válvula de control tipo Mariposa.

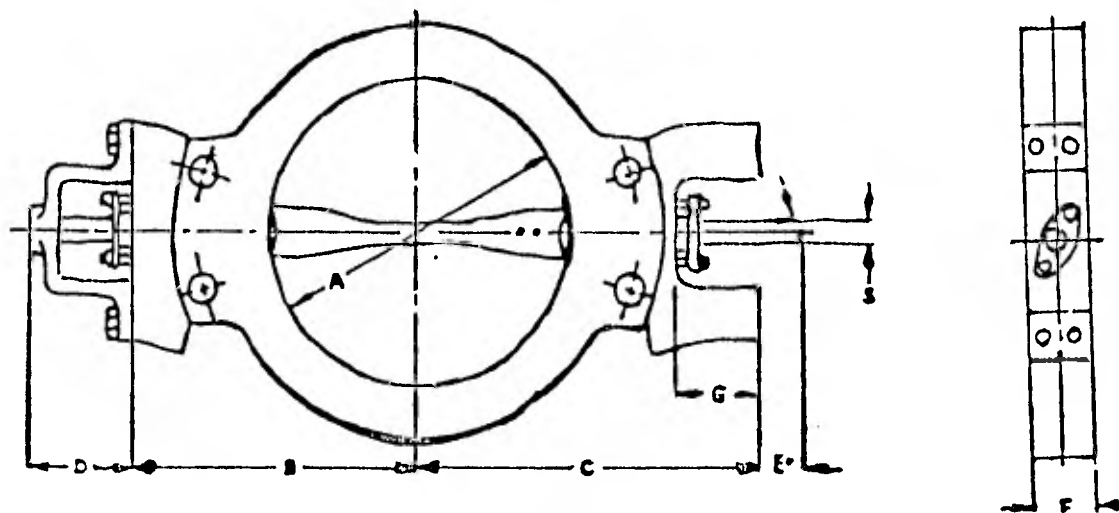


Figura 6.11 Vista Frontal y Lateral del cuerpo de una válvula de control tipo Mariposa.

La parte móvil es un disco, cuyo diámetro coincide con el diámetro interno del cuerpo, el disco gira desde 0° a 90° mediante una flecha conectada al actuador.

El par requerido para mover el disco varía considerablemente durante la apertura, debido a que el disco produce, una velocidad más grande en un lado que en el otro y esto da como resultado, un par que tiende a cerrar la válvula. La variación del par se presenta en la figura 6.13.

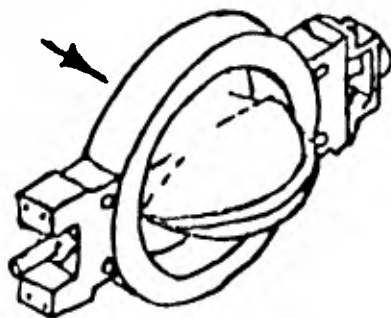


Figura 6.12 Isométrico del cuerpo de una Válvula de control tipo Mariposa.

El par requerido para mantener una posición del disco es NULO para 0° y para 90° , pero tiene un máximo para 70° aproximadamente.

El par producido por un disco convencional es muy grande por lo que las válvulas de mariposa con un disco así, se limitan a una apertura máxima de 60° .

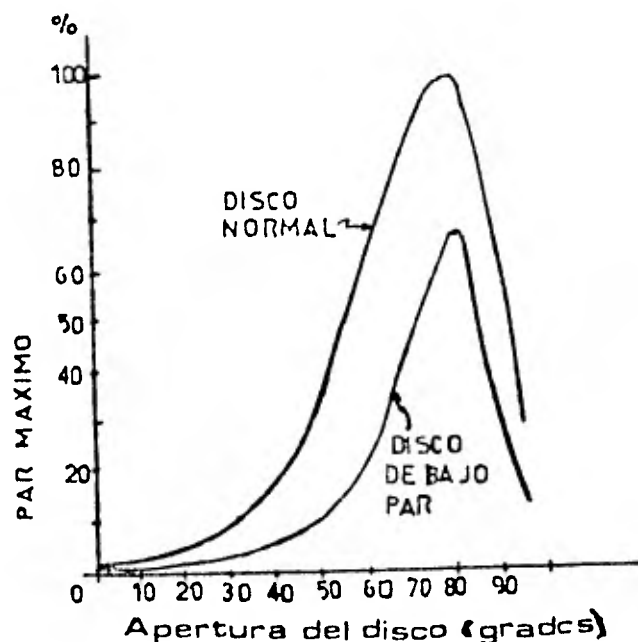


Figura 6.13 Características del ángulo de giro del disco contra el par máximo requerido.

Para evitar esta limitación, se han desarrollado discos con contornos hidrodinámicos, llamados discos de bajo par, los cuales se muestran en la figura 6.14.

La característica de flujo de las válvulas de mariposa se acerca mucho a la de igual porcentaje, su relación gama es típicamente de 33/1 en discos convencionales, y de 100/1 para el disco de bajo par (tipo cola de pescado). Cuando se requiere de un cierre hermético, las válvulas de mariposa pueden ser recubiertas con un material elastómero como BUNAN o VITON.



Figura 6.14 Discos de bajo par o con contornos hidrodinámicos.

Válvulas de Tipo bola.- Aunque este tipo de válvulas tienen mucho tiempo de haber sido desarrolladas, no fue sino hasta la década de 1960 en que fueron utilizadas como válvulas de control automático.

Su impulso se debió al desarrollo de materiales elásticos y de los fluorocarbonos, en particular TEFLON, que dan a las válvulas de bola un cierre hermético excelente. Son de mucha aplicación en industrias como la del papel y la azucarera, por su capacidad de manejar líquidos con fibras.

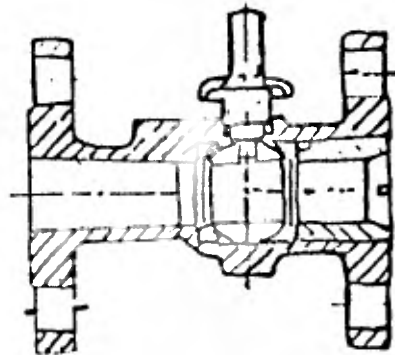


Figura 6.15 Corte seccional del cuerpo de una válvula de control tipo bola.

Los tamaños de estas válvulas van desde 1" hasta 24" comúnmente, se pueden instalar en forma bridada, roscada o entre bridas, y pueden ser construidas en una gran variedad de aleaciones.

En las válvulas de bola el cuerpo contiene una esfera giratoria con un corte tal que al girar, produce la modulación del flujo.

La esfera puede ser completa, o un segmento esférico, conectado por una flecha a un mecanismo movido por el actuador.

La forma de corte de la esfera segmental puede variar, según la característica del flujo requerido. La figura 6.16 --

El diafragma cierra el paso del fluido asentando sobre una ceja delineada en el cuerpo de la válvula. El movimiento del diafragma se consigue por una pieza opresora que se conecta al actuador.

El cuerpo de la válvula se puede recubrir fácilmente con un material resistente a la corrosión, siendo ésta su principal ventaja. La desventaja que presenta es que: la fuerza necesaria para cerrar la válvula, es muy grande por lo que muchas veces se requiere un actuador de pistón, por ello este tipo de válvulas se limita a 8" máximo. La característica de control no es muy buena, puesto que es aproximadamente de apertura rápida.

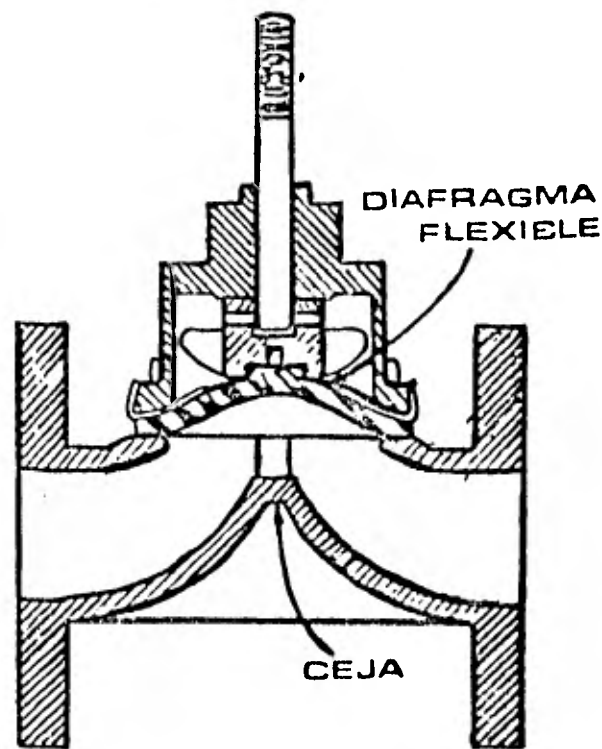


Figura 6.17 Cuerpo de una Válvula de control tipo diafragma.

Otros tipos de Válvulas.- Otros tipos de válvulas son las de "compuerta", las de pellizco, la "tapón excéntrico" y otras, pero se han dejado fuera por su poca aplicación en los procesos industriales.

6.5 Posicionadores.

El posicionador es un complemento de los actuadores muy utilizado. Este recibe la señal de control y mide la posición del vástago del actuador, la compara y si existe error, manda al actuador la señal de corrección, hasta que este tenga exactamente la posición requerida por la señal de control.

Su función es confirmar que el actuador llega precisamente a la posición deseada evitando así errores generados por histéresis, fricciones, o por no linealidades propias del diafragma. También reduce el tiempo de respuesta del actuador, y en determinadas aplicaciones puede también amplificar la señal de presión cuando se requieren fuerzas relativamente grandes.

En el caso de válvulas de control se aplican comúnmente para los siguientes casos:

- Válvulas de control de temperatura
- Válvulas de globo balanceadas de 6" o más
- Válvulas de globo desbalanceadas de 3" o más
- Válvulas de mariposa
- Válvulas de diafragma
- Caídas de presión de 100 lb/pulg² o más
- Líneas de transmisión neumática de 100 m o más
- Sistemas de control en cascada o controles múltiples
- Sistemas de rango dividido
- Cuando un controlador maneja 2 válvulas o más
- Cuando se requiere mayor presión sobre el actuador.

6.6 Selección de Válvulas de Control.

La selección de una válvula de control, se hace de acuerdo a:

El tamaño

La característica de flujo

El material

El tipo.

El Tamaño.- En una válvula de control, está en función del factor de capacidad Cv de acuerdo a las tablas de los fabricantes. El Cv se define como el número de galones - de agua por minuto a 60°F que atraviesan la válvula, cuando la caída de presión es de una libra por pulgada cuadrada.

El tamaño de la válvula se puede seleccionar como - una primera aproximación, de tal forma que el Cv normal este al 70% de la capacidad normal de la válvula y que el Cv máximo este abajo del 90%. Para ello se necesita conocer el flujo máximo y flujo normal, así como la densidad del fluido y la caída de presión para sustituir en la expresión siguiente:

$$Cv = W \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$$

donde:

W $\hat{=}$ gasto normal ó máximo según el caso.

ΔP $\hat{=}$ caída de presión a través de la válvula.

G $\hat{=}$ densidad relativa.

El procedimiento completo para el cálculo del Cv de la válvula, se publicó por la Instrument Society of America en sus estandares I S A S 3 9.1 e I S'A 3 9.9. A continuación se presenta el método de cálculo para líquidos que no vaporizan dentro de la válvula. La fórmula empleada es:

$$F_p Cv = \frac{W_n}{F_R C_1 \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}}$$

donde:

W_n $\hat{=}$ gasto nominal a través de la válvula
[GPM] o [m³/h]

Cv $\hat{=}$ coeficiente de la válvula o factor de capacidad, proporcionado por el fabricante.

muestra una vista seccional de la válvula tipo globo. En el caso de esfera completa, la esfera tiene dos orificios opuestos, comúnmente circulares, lo que le da una característica parecida a una de igual porcentaje.

En las válvulas de bola el par requerido para vencer la fricción entre el asiento y la esfera llega a ser considerablemente grande sobre todo en las válvulas grandes, sujetas a caídas de presión grandes, por lo que es común que los actuadores usados en estas válvulas sean de pistón en vez de diafragma.

La presencia de materiales elastómeros para proporcionar el cierre hermético puede acarrear una limitación en las temperaturas de operación de las válvulas de bola.

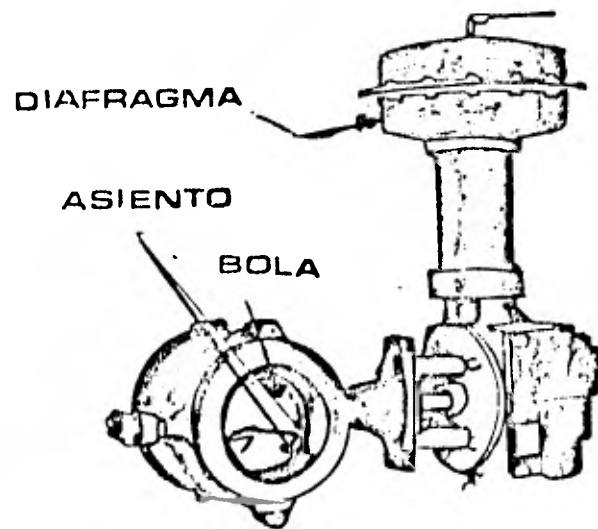


Figura 6.16 El corte de la esfera segmentada, varía según la característica de la válvula que se requiera.

Válvulas de Diafragma.— Cuando el fluido es extremadamente corrosivo es común aplicar las válvulas de diafragma. En las que sólo el cuerpo de la válvula y un diafragma de material elastómero, están en contacto con el fluido.

$F_R \hat{=}$ factor del número de Reynolds, Vale 1.0 para flujo turbulento *

$F_p \hat{=}$ factor que depende de la geometría de la tubería

$C_1 \hat{=}$ constante de proporcionalidad

$C_1 = 0.8566$ en el sistema Métrico

$C_1 = 1.000$ en el sistema Inglés

$\Delta P \hat{=}$ caída de presión a través de la válvula en $[Kg/cm^2]$ o $[psig]$

$G \hat{=}$ densidad relativa al agua a 60°F.

Primero se calcula $F_p C_v$ sustituyendo datos en el lado derecho de la ecuación y se escoge una válvula según el catálogo de los proveedores, cuyo C_v al 100 % o Cvs sea un poco mayor o igual que el $F_p C_v$ calculado. Además se calcula el F_p de la manera siguiente:

- Se calcula la capacidad unitaria de la válvula (Cd) según:

$$Cd = \frac{Cvs}{d^2}$$

donde:

$d \hat{=}$ diámetro de la válvula seleccionada $[m \text{ m } \text{ ó } \text{ pulg}]$

- Se calcula la suma de los coeficientes de carga de velocidad como:

$$\Sigma K = K_1 + K_2 + K_{B1} - K_{B2}$$

$$K_1 = 0.5 \left[1 - (d/D_1) \right]^2$$

$$K_2 = \left[1 - (d/D_2) \right]^2$$

* Si el flujo no es turbulento el F_R deberá obtenerse de las páginas 130 y 131 del Manual de válvulas de control de la ISA o de la figura 2 del artículo "Control Valve Sizing with ISA Formulas" ... How to apply the New Standards" publicado en el número de julio de 1974 de Instrumentation Technology.

$$K_{B1} = 1 - (d/D_1)^4 \quad \text{coeficientes de Bernoulli}$$

$$K_{B2} = 1 - (d/D_2)^4$$

donde:

$D_1 \hat{=}$ diámetro nominal de la tubería de entrada
(m m ó pulg)

$D_2 \hat{=}$ diámetro nominal de la tubería de salida

finalmente el factor de geometría F_p se calcula según:

$$F_p = \left[\frac{\sum K(C_d)^2}{C_2} + 1 \right]^{-1/2}$$

donde:

$C_2 =$ constante de proporcionalidad

$C_2 = 0.00214$ en el sistema Métrico

$C_2 = 890$ en el sistema Inglés.

Habiendo obtenido F_p , C_v y F_p según los procedimientos anteriores, el factor de capacidad se calcula como:

$$C_v = \frac{F_p C_v}{F_p}$$

Para líquidos que vaporizan dentro de la válvula con flujo turbulento, se utiliza la fórmula siguiente:

$$F_{LP} C_v = \frac{W}{F_R C_1 \sqrt{\frac{P_1 - P_v F_F}{G}}}$$

donde:

$P_v \hat{=}$ presión de vaporización del líquido a la temperatura de entrada

$F_F \hat{=}$ factor de relación de presión crítica en líquidos definido por

$$F_F = 0.96 - 0.28 \sqrt{P_v/P_c}$$

$P_c \hat{=}$ Presión crítica termodinámica
(Kg/cm² abs o psia).

Primero se calcula $F_{LP} C_v$ como en el caso anterior, sustituyendo datos en el lado derecho de la ecuación. Después se escoge una válvula cuyo C_v al 100% sea un poco mayor que el $F_{LP} C_v$ calculado.

Se calcula la capacidad unitaria C_d de la válvula

$$C_d = C_{vs}/d^2$$

Se calcula el coeficiente de carga de velocidad de entrada (K_i) según:

$$K_i = K_1 + K_{B1}$$

donde:

$$K_1 \hat{=} \text{coeficiente de resistencia de la conexión de entrada } K_1 = 0.5 \left[1 - (d/D_1)^2 \right]^2$$

$$K_{B1} \hat{=} \text{coeficiente de Bernoulli } K_{B1} = 1 - (d/D_1)^4$$

con lo anterior se calcula F_{LP} :

$$F_{LP} = \left[\frac{1}{F_L^2} + \frac{K_1 (C_d)^2}{C_2} \right]^{1/2}$$

nuevamente:

$$C_2 \hat{=} \text{constante de proporcionalidad}$$

$$F_L \hat{=} \text{factor de recuperación de presión en líquidos}$$

y el coeficiente de válvula es:

$$C_v = \frac{F_{LP} C_v}{F_{LP}}$$

Una vez calculado C_v con el flujo normal se selecciona la válvula del catálogo del fabricante.

Para gases con flujo turbulento se utiliza la fórmula siguiente:

$$F_P C_V = \frac{W}{C_3 P_1 Y \sqrt{\frac{X}{G T_1 Z}}}$$

donde las variables no definidas hasta el momento son:

$C_3 \hat{=}$ constante de proporcionalidad
408.952 para el sistema Métrico
1360 para el sistema Inglés.

$P_1 \hat{=}$ Presión absoluta de entrada [Kg/cm^2] o [psia.]

$Y \hat{=}$ factor de expansión

$T_1 \hat{=}$ temperatura absoluta de entrada [$^{\circ}\text{K}$ ó $^{\circ}\text{R}$]

$X \hat{=}$ relación de la caída de presión a la presión de entrada absoluta

$Z \hat{=}$ factor de compresibilidad (ver páginas 272 a 276 del manual de válvulas ISA).

Inicialmente, se hace necesario calcular:

$$Y = 1 - \frac{X}{3F_k X_t}$$

$$F_k = \frac{K}{1.4}$$

$$K = \frac{C_p}{C_v}$$

$$X = \frac{\Delta P}{P_1}$$

en estas últimas fórmulas:

$F_k \hat{=}$ factor de relación de calores específicos.

$K \hat{=}$ relación de calores específicos

$C_p \hat{=}$ calor específico a presión constante

$C_v \hat{=}$ calor específico a volumen constante

$X_t \hat{=}$ factor de relación de caída de presión (ver página 127 del manual de válvulas de control de ISA).

Si $Y < 0.667$ se debe hacer igual a 0.667 modificando la ΔP .

Sustituyendo los datos en el lado derecho de la ecuación se encuentra $F_p C_v$ luego se sigue el mismo procedimiento para encontrar F_p y se determina C_v como:

$$C_v = \frac{F_p C_v}{F_p}$$

Para válvulas en servicio de vapor y flujo turbulento se utiliza la fórmula:

$$F_p C_v = \frac{W}{C_4 Y \sqrt{\Delta P \gamma_1}}$$

donde las variables no definidas hasta en momento son:

$C_4 \hat{=}$ constante de proporcionalidad
27.0353 en sistema Métrico
63.3 en el sistema Inglés.

γ_1 = densidad a la entrada de la válvula
 $[\text{Kg/m}^3]$ o $[\text{lb/pie}^3]$

Nuevamente, se sustituyen datos en el lado derecho para encontrar $F_p C_v$ y se calcula F_p para encontrar C_v como:

$$C_v = \frac{F_p C_v}{F_p}$$

La característica de Flujo de la válvula.- La razón para utilizar diferentes características, es para mantener la estabilidad de la malla de control dentro de una gama amplia de valores de flujo.

Las válvulas con característica de apertura rápida, son recomendables en sistemas de control ON-OFF. Tales sistemas pueden ser controlados dentro de una banda de error como se mencionó en el capítulo IV. En el ejemplo del control de -

nivel la válvula solenoide, puede ser remplazada por una de apertura rápida.

Las válvulas lineales.- Se usan por ejemplo cuando la caída de presión a través de la válvula es constante prácticamente y existe una relación lineal entre la variable controlada y el gasto de la variable manipulada. Considere-se el flujo de vapor desde una fuente de presión constante - que pasa por la válvula de control hacia la camisa de un intercambiador de calor. El líquido del proceso fluye a través de la tubería del intercambiador y se calienta mediante el vapor. Existe una relación lineal entre la temperatura de salida del proceso y el flujo de vapor, ya que cada kilogramo de vapor proporciona una cierta cantidad de calor.

Las válvulas de igual porcentaje.- Se utilizan cuando la caída de presión a través de la válvula no es constante, para aclarar considere el proceso que se muestra en la figura 6.18.

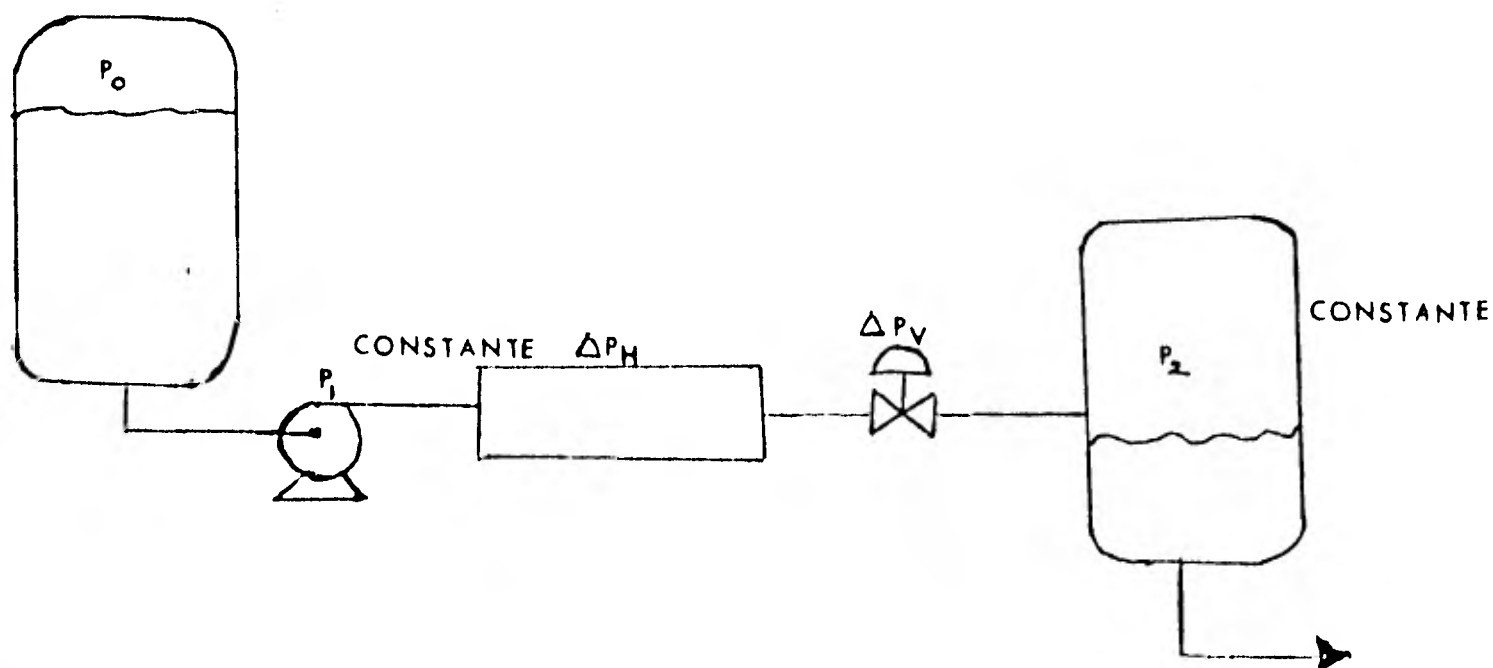


Figura 6.18 Proceso en el que se usa una válvula de igual porcentaje.

La presión de operación total es $P_1 - P_2$. En la medi-

da que incrementa el gasto, también incrementa la caída de presión ΔP_H a través del intercambiador y la tubería asociada, por lo cual la caída de presión a través de la válvula debe disminuir. Esto significa que la válvula de control tiene que abrir más que si la caída de presión fuera constante, a valores de flujo pequeños, la mayor parte de la caída de presión debe ser a través de la válvula, puesto que la caída de presión a través del intercambiador disminuye de acuerdo a la raíz cuadrada de flujo. En esta situación la característica de igual porcentaje proporciona una relación más próxima a la lineal entre el flujo y la posición del émbolo de la válvula.

Desde el punto de vista de control ΔP_v debe ser grande, desde el punto de vista económico ΔP_v debe ser pequeño, por lo cual debe establecerse un compromiso.

Como se demostró en el capítulo III la función de transferencia de la válvula es:

$$\frac{\Delta W}{\Delta(VP)} = \frac{K_v}{\tau_v S + 1}$$

la constante de tiempo τ_v dependerá del tamaño de la válvula, para válvulas mayores de 4 pulgadas τ_v puede ser del orden de 5 segundos. Si se requiere acelerar la respuesta de la válvula, debe emplearse posicionador.

La selección de la característica en forma rigurosa, se hace de acuerdo a un análisis dinámico del proceso, sin embargo a continuación se dan algunos criterios de acuerdo a la variable controlada.

Sistemas de Nivel. - Para los controles de nivel es posible usar la característica lineal, a menos que la caída de presión decrezca al aumentar la carga hasta un 20% o menos de la caída ΔP a la carga mínima, en este caso se recomienda una de igual porcentaje.

Sistemas de Presión.- En este caso es recomendable la característica de igual porcentaje, a menos que la caída de presión ΔP disminuya al aumentar la carga, hasta un 20 % o más, entonces se prefiere una válvula lineal.

Sistemas de Flujo.- Si el rango del punto de ajuste de flujo es muy amplio, se recomienda una válvula lineal. Si el rango es pequeño pero hay aumentos de la caída de presión al disminuir la carga, entonces se recomienda una válvula de igual porcentaje.

Los factores que intervienen en la selección de los materiales de construcción son entre otros, corrosión, erosión, presión, temperatura y costo. Si los factores anteriores lo permiten, lo usual es utilizar para el cuerpo, acero al carbón ASTM A 216, grado WCB y para los interiores acero inoxidable ASTM A 351 grado CF8M.

Temperatura.- Para temperaturas menores a -150°F se recomiendan aceros inoxidables. Para altas temperaturas es común encontrar en los interiores los aceros llamados "estelitados".

Presión.- Cuando la caída de presión a través de la válvula es grande, la erosión puede dañar el interior de la válvula, en estos casos el material puede ser de acero inoxidable de la serie 400, o bien Rockwell-C para servicios de temperatura hasta 850°F .

Corrosión.- Una gran variedad de materiales resistentes a la corrosión se usan para la manufactura de válvulas, entre ellos el Hastelloy, Monel, Nickel, Duriment, Titanio. En algunos casos se pueden recubrir de materiales plásticos como pentón, teflón o kynar, además algunas válvulas se pueden construir totalmente de estos plásticos.

Las recomendaciones anteriores son sólo ejemplos de la selección de materiales, para una selección confiable, es

necesario consultar con el fabricante de las válvulas.

Tipo.- Es muy común encontrar que la mayoría de las válvulas de control son de tipo GLOBO especialmente las de CAJA, a menos que no puedan aplicarse. Sus limitaciones principales son: tamaño (hasta 6" comúnmente), no pueden manejar líquidos sucios con materiales fibrosos, su precio - puede ser alto cuando se requiere resistencia a la corrosión.

Si el tamaño es grande, se puede pensar en una válvula de Mariposa, siendo sus limitaciones, la caída de presión debe ser baja, la característica es sólo aproximadamente igual porcentaje, por lo que el control no es muy preciso.

Si se requiere manejar líquidos con materiales fibrosos, se sugiere una válvula de bola (especialmente la de puerto en "V") el tamaño no es limitante, su control es bueno.

Cuando no se requiere de un control muy preciso y el fluido es muy corrosivo, las válvulas de diafragma pueden dar resultado: si el tamaño no es muy grande.

Para servicios muy corrosivos también es común recubrir válvulas de mariposa con materiales resistentes. Si el costo no es muy grande, una válvula de globo se puede hacer de metales tales como Hastelloy o Monel.

En los casos en que sea necesario un cierre hermético, las válvulas de globo serán de puerto sencillo, las de caja desbalanceadas, y las de mariposa recubiertas con algún elastómero. Las de bola son herméticas de por sí, al igual que las de diafragma.

6.7 Actuadores.

Un actuador es el mecanismo que convierte la señal de control eléctrica o neumática, en el movimiento que efec-

túa el elemento final de control. Los actuadores pueden mover válvulas de control, compuertas, reguladores de tiro, guías para transportes de sólidos, en fin, cualquier mecanismo que actúe directamente sobre el proceso.

Las señales de control de los actuadores puede ser hidráulicas, neumáticas o eléctricas, siendo las más comunes éstas dos últimas. Las acciones pueden ser modulantes o del tipo "ON-OFF".

Actuadores Neumáticos.- Los actuadores neumáticos pueden ser de DIAFRAGMA o de PISTON. Los de diafragma son los más comunes por su amplia aplicación sobre válvulas de control y pueden actuar en controles "ON-OFF" o modulantes.

En los actuadores de diafragma la señal neumática actúa sobre un diafragma flexible, generalmente de neopreno reforzado con fibra de vidrio, la fuerza debida a la presión y al área del diafragma está en contraposición con un resorte de "recuperación". La fuerza necesaria para mover el tapón de una válvula de control depende del área del puerto de la caída de presión y del tipo de válvula. Existen tamaños diferentes de diafragmas según la fuerza requerida.

La caja puede ser de aluminio o de acero y está separada en dos partes por el diafragma, de un lado actúa el aire y del otro el resorte.

Dependiendo de cual sea el lado del diafragma donde actúa el aire, será de acción directa o acción reversa, en el de acción directa el aire baja el diafragma comprimiendo el resorte.

La selección de un actuador de acción directa o reversa, depende de la "posición a falla de aire" que requiera la válvula. Así por ejemplo, una válvula que cierra al bajar el tapón, quedará en posición cerrada con un actuador de acción reversa.

La linealidad y el bajo costo hacen del diafragma el actuador más común para controles modulantes. En la figura siguiente se muestran las partes que forman un actuador de diafragma.

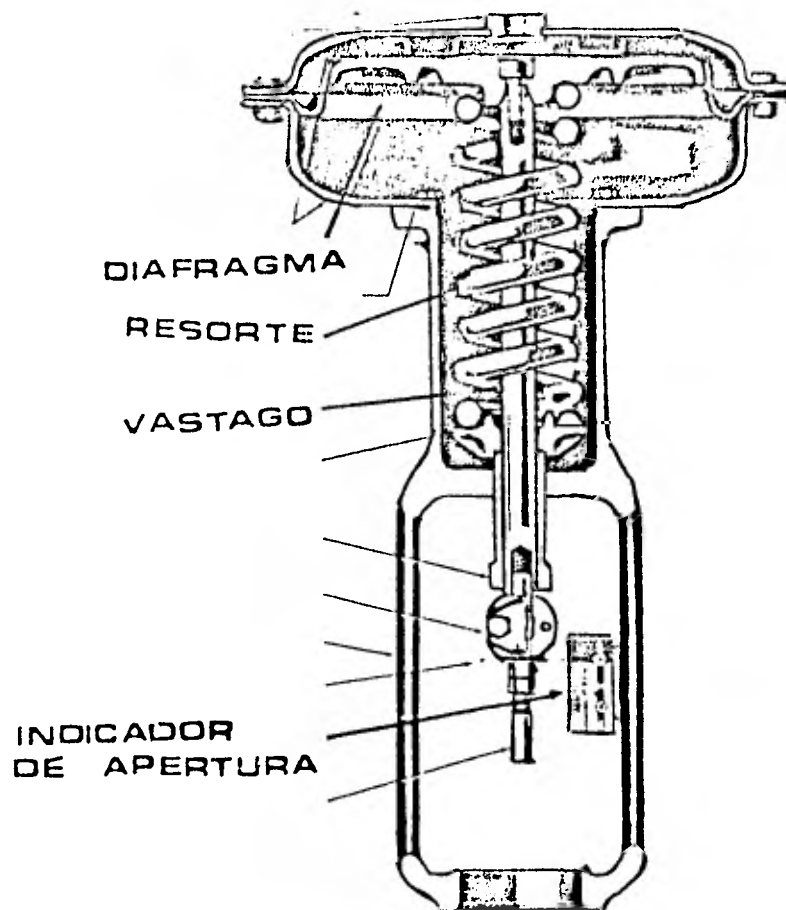


Figura 6.19 Partes constitutivas de un actuador neumático.

LISTA DE PARTES DEL ACTUADOR DE LA FIG. 6.19

- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| 1.- Caja superior | 10.- Vástago |
| 2.- Diafragma | 11.- Asiento del resorte |
| 3.- Tornillo del vástago | 12.- Ajuste del resorte |
| 4.- Plato del diafragma | 15 y 16.- Tuerca y contra tuerca |
| 5.- Caja inferior | 18.- Placa de identificación |
| 6.- Resorte | 19.- Indicador de viaje |
| 8, 22, 23.- Tornillos | 26.- Conector de vástago |
| 9.- Yugo | LP Guías. |

El otro tipo de actuadores neumáticos son los de PISTON en construcción permite presiones neumáticas o hidráulicas

mucho mayores que un diafragma, por lo que se utilizan cuando se requiere de una fuerza muy grande sin mucha presión.

Los pistones pueden ser actuados por una señal neumática en oposición de un resorte. Pueden ser actuados por dos señales neumáticas, una para abrir y otra para cerrar. - O bien pueden ser actuados por una señal neumática y generar mediante un posicionador otra señal de balance.